

УДК 001.8
ББК 72+30
В 38

Главный редактор
доктор экономических наук
профессор Г. П. Беляков

Заместитель главного редактора
доктор физико-математических наук
профессор С. И. Сенашов

Редакционная коллегия:

Т. В. Зеленская, А. Н. Ловчиков, А. В. Медведев,
В. А. Охорзин, А. С. Павлов (отв. секретарь), А. С. Паршин,
З. Г. Сангадиев, В. Г. Сомов, В. В. Филатов,
Ю. А. Филиппов, Л. Г. Шаймарданов

Издание включено ВАК России в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика В 38 М. Ф. Решетнева / под ред. проф. Г. П. Белякова; СибГАУ. Вып. 6. Красноярск, 2005. 326 с.

ISBN 5-86433-239-9

УДК 001.8
ББК 72+30

ISBN 5-86433-239-9

© Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2005
© Коллектив авторов, 2005

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

В 2005 г. исполняется 45 лет со дня образования нашего вуза. В 1960 г. вуз имел два факультета и три выпускающих кафедры. Сегодня СибГАУ – многопрофильное высшее учебное заведение, реализующее профессионально-образовательные программы по 29 специальностям и направлениям в области проектирования и производства ракетно-космической техники, экономики и бизнеса. Имеет десять факультетов, два филиала, два института. Общее число студентов – более 7 000 человек, преподавателей – более 400, из них 60 докторов наук и более 200 кандидатов наук.

Основные научные направления университета следующие:

- нанотехнологии и функциональные наноструктурные материалы;
- магнитные свойства кристаллов;
- математическое моделирование и численные методики;
- космическая техника и ракетостроение;
- современные технологии в производстве ракетно-космической техники;
- управление и автоматизация в технических системах;
- системы связи, телекоммуникации и навигации;
- механика геоматериалов, релаксационные процессы, мониторинг массивов горных пород;
- региональная экономика, экономика и организация предприятия;
- гуманитарные и социальные проблемы и отношения;
- международное сотрудничество в области высшего профессионального образования и подготовки кадров.

Университет поддерживает долгосрочные инновационные взаимосвязи с базовыми предприятиями: Красноярским машиностроительным заводом, Научно-производственным объединением прикладной механики имени академика М. Ф. Решетнева, авиакомпанией «Красноярские авиалинии», Красноярским заводом холодильников «Бирюса».

Как периодическое издание научных трудов «Вестник СибГАУ» выходит с 2000 г. Он включен Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Представленный читателям выпуск «Вестника Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева» содержит результаты научных исследований в области естественных и точных, технических и прикладных наук, связанных с вопросами проектирования, производства и эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники, а также экономики, и посвящается 45-летию образования нашего университета.

Редакционная коллегия выражает надежду, что журнал будет востребован научными работниками, преподавателями, аспирантами и студентами, а также читателями, интересующимися новыми научными достижениями.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В «ВЕСТНИК СИБГАУ»

О содержании. В статье необходимо сформулировать проблемы, отразить объект исследования, достигнутый уровень процесса исследования, новизну результатов, область их применения. Статья должна заканчиваться выводом. Текст вывода набирается отдельным абзацем (абзацами), в котором акцентируется новизна результатов, эффективность их использования и др. Количество авторов одной статьи не более пяти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй раз – в соавторстве.

Об оформлении. Статью необходимо набрать на компьютере в редакторе Word шрифтом Times New Roman Суг, распечатать на бумаге форматом А4 (210×297 мм).

Оригинал должен быть чистым, не согнутым, без ручных правок, страницы пронумерованы на обороте. Оригинал статьи не должен содержать более 5–6 страниц формата А4, включая рисунки, таблицы и библиографический список. Объем научного сообщения – 1–2 страницы. Наряду с распечатанной представляется электронная версия на диске 3,5 дюйма или CD.

Поля. Сверху и снизу – по 2,5 см.; слева и справа – по 2 см.

Заголовок и аннотация. В верхнем левом углу листа проставляется индекс УДК. Далее по центру шрифтом Times New Roman Суг размером 10¹ пт – инициалы, фамилия автора (ов), строкой ниже полное название организации. Ниже по центру шрифтом 12 пт печатается название статьи и через строку резюме – шрифтом 10 пт.

Не допускается (!):

– набор всех указанных текстов прописными (заглавными) буквами;

– жирным шрифтом;

– помещение всех указанных элементов в рамки и имитация оформления набора, выполняемого в журнале.

Ниже через 1 строку помещают основной текст статьи.

Основной текст статьи набирается шрифтом Times New Roman Суг 10 пт. Абзацный отступ 0,5 см. Межстрочный интервал одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается.

Ссылки на литературные или иные источники оформляются числами, заключенными в квадратные скобки (например, [1]). Ссылки должны быть последовательно пронумерованы. Сам библиографический список помещается после основного текста.

Примечания оформляются числами в виде верхнего индекса. Примечания должны быть последовательно пронумерованы. Тексты примечаний помещаются после основного текста перед библиографическим списком.

Формулы. Простые внутривстрочные и однострочные формулы должны быть набраны без использования специальных редакторов – символами (шрифт Symbol). Специальные сложные символы, а также сложные и многострочные формулы, которые не могут быть набраны обычным образом, должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Набор математических, химических формул в пределах всего текста должен быть единообразен:

– греческие символы – прямым шрифтом, латинские – курсивом, русские обозначения – прямым;

– размер обычного символа – 10 пт, крупный индекс – 8 пт, мелкий индекс – 7, крупный символ – 10 пт., мелкий символ – 8 пт.

Формулы набранные отдельными строками располагаются по центру.

Не допускается (!) набор в основном тексте статьи простых латинских, греческих или специальных символов в редакторе формул.

Таблицы должны быть последовательно пронумерованы (светлым курсивом, например, «Таблица 1» с выравниванием вправо) и ниже – озаглавлены (заглавие набирается жирным шрифтом по центру). Если таблица имеет большой объем, она может быть помещена на отдельной странице, а в том случае, когда она имеет значительную ширину, – на странице с альбомной ориентацией. Таблицы набираются шрифтом 9 пт. Заголовки глав должны быть центрированы.

Иллюстрации должны быть последовательно пронумерованы (обычным шрифтом, например, «Рис. 1» с выравниванием по центру) и, если необходимо, содержать подписанную подпись (шрифт 9 пт с выравниванием по центру).

Иллюстрации могут быть сканированными с оригинала (в градациях серого с разрешением 150 dpi) или выполнены средствами компьютерной графики. **Размещать иллюстрации необходимо в отдельном файле электронной версии с расширением tiff.**

Не допускается помещение иллюстраций в цветном режиме или с разрешением 300 dpi и более.

Библиографический список. Если в тексте есть ссылки на литературные или иные источники информации, номера которых заключены в квадратные скобки, то ниже основного текста (или текстов примечаний) печатается по центру заглавие «Библиографический список» и помещается пронумерованный перечень источников в соответствии с действующими требованиями к библиографическому описанию.

Текст на английском языке. В конце статьи приводится английский перевод заглавия статьи, фамилии автора, названия организации и резюме.

К распечатанному варианту статьи необходимо приложить следующие **сведения об авторе:** фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность, место работы, количество научных трудов и область их использования, номер телефона, а также **экспертное заключение о возможности открытой публикации материалов.**

Статья должна быть подписана всеми авторами!

**СТАТЬИ РЕЦЕНЗИРУЮТСЯ.
ОТКЛОНЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НЕ ВОЗВРАЩАЮТСЯ.**

¹ Пункт (пт) – размер шрифта

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ДВУХКАНАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Рассматривается децентрализованная обработка информации в двухканальных измерительных системах при косвенном измерении для различных алгоритмов фильтрации оценки вектора состояния в измерительных пунктах и пункте обработки информации. Проводится сравнительный анализ результатов имитационного моделирования синтезированных алгоритмов.

Задача обеспечения высокой точности оценивания координат и параметров траектории движения объекта может быть решена за счет применения многоканальных измерительных систем с оптимальной централизованной обработкой [1]. Алгоритмы оптимальной многоканальной калмановской фильтрации предполагают объединение в пункте обработки информации (ПОИ) оценок векторов наблюдаемых параметров, рассчитанных в измерительных пунктах.

Централизованной обработке присущи следующие недостатки [2]:

- необходимость передачи с измерительных пунктов в пункт обработки информации всего объема получаемой информации;
- большой объем вычислительных операций в пункте обработки информации для определения координат и параметров траектории цели;
- необходимость предварительного приведения оценок измерительных пунктов к единой системе координат и др.

Для устранения этих недостатков представляется целесообразным предусмотреть фильтрацию оценок текущих траекторных измерений в измерительных пунктах. Применение фильтрации координатной информации в измерительных пунктах позволит в случае неисправности системы обработки в одном или нескольких из этих пунктов производить оценивание координат объекта с относительно высокими точностными характеристиками.

В работе производится сравнительный анализ эффективности функционирования двух систем децентрализованной обработки информации. В измерительных пунктах применяются алгоритмы фильтрации Калмана.

В первом алгоритме обработки результаты оценок векторов состояния, рассчитанных в измерительных пунктах, комплексуются в ПОИ (Ф–О-алгоритм). Во втором алгоритме в ПОИ осуществляется их фильтрация (Ф–Ф-алгоритм).

Ввиду того что оценки векторов состояния первого ($\hat{\alpha}_1$) и второго пунктов ($\hat{\alpha}_2$) независимы, то для синтеза алгоритма, основанного на алгоритме комплексирования соответствующих оценок $\hat{\alpha}_1$ и $\hat{\alpha}_2$ в ПОИ, используем методику, приведенную в [3].

Оценки $\hat{\alpha}_1$ и $\hat{\alpha}_2$ на выходе измерительных пунктов имеют нормальный закон распределения [3]

$$p(\alpha) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |C_i|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-(\alpha - \hat{\alpha}_i)^T C_i (\alpha - \hat{\alpha}_i) / 2\right], \quad (1)$$

где α – оцениваемый случайный вектор состояния; C_1, C_2 – симметричные матрицы точности соответственно для первого ($i=1$) и второго ($i=2$) измерительных пунктов ($i=1, 2$).

Найдем выражение логарифма совместной плотности вероятности:

$$\ln p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2) = -(1/2)(\alpha - \hat{\alpha}_1)^T C_1 (\alpha - \hat{\alpha}_1) - (1/2)(\alpha - \hat{\alpha}_2)^T C_2 (\alpha - \hat{\alpha}_2) + \text{const}. \quad (2)$$

Преобразуем (2) и, изменяя постоянную, получим

$$\ln p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2) = -(1/2)\alpha^T (C_1 + C_2)\alpha + (1/2)\alpha^T (C_1\hat{\alpha}_1 + C_2\hat{\alpha}_2) + (1/2)(C_1\hat{\alpha}_1 + C_2\hat{\alpha}_2)\alpha + \text{const}. \quad (3)$$

Введем матрицу

$$C_p = C_1 + C_2 \quad (4)$$

и вектор-столбец

$$C_p \hat{\alpha}_p = C_1 \hat{\alpha}_1 + C_2 \hat{\alpha}_2. \quad (5)$$

Как и матрицы $C_1 = C_1^T, C_2 = C_2^T$, матрица (4) обладает свойствами симметрии: $C_p = C_p^T$. Транспонируя (5), получаем

$$\hat{\alpha}_p^T C_p = \hat{\alpha}_1^T C_1 + \hat{\alpha}_2^T C_2. \quad (6)$$

В силу (4), (5), выражение (3) после изменения постоянной принимает вид

$$\ln p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2) = -(1/2)(\alpha - \hat{\alpha}_p)^T C_p (\alpha - \hat{\alpha}_p) + \text{const}. \quad (7)$$

Определяя отсюда плотность вероятности $p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2)$ и постоянную (7) по условию нормировки, приходим к стандартной форме записи многомерного нормального закона:

$$p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |C_p|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-(1/2)(\alpha - \hat{\alpha}_p)^T C_p (\alpha - \hat{\alpha}_p)\right]. \quad (8)$$

Формально введенные величины C_p и $\hat{\alpha}_p$ приобретают отчетливый смысл результирующей матрицы точности и результирующей оценки вектора состояния на выходе ПОИ. Последняя, в силу (5), определяется выражением

$$\hat{\alpha}_p = C_p^{-1} (C_1 \hat{\alpha}_1 + C_2 \hat{\alpha}_2). \quad (9)$$

Оценка $\hat{\alpha}_p$ соответствует максимуму послеопытной плотности вероятности $p(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2)$. Она оптимальна по критерию минимума как при квадратичной, так и при простой функции стоимости.

Вычисление результирующей матрицы точности сводится, согласно (4), к суммированию матриц точности C_1 и C_2 . Результирующая корреляционная матрица ошибок C_p^{-1} получается путем обращения результирующей матрицы точности C_p .

Результирующая оценка вектора состояния $\hat{\alpha}_p$ сводится к весовой сумме оценок $\hat{\alpha}_1$ и $\hat{\alpha}_2$.

Произведем синтез Ф–Ф-алгоритма, который основывается на фильтрации в ПОИ оценок $\hat{\alpha}_{1k}$ и $\hat{\alpha}_{2k}$, полученных в результате вторичной обработки в измерительных пунктах (k – номер такта измерения).

Результирующую оценку вектора состояния $\hat{\alpha}_{pk}$, рассчитанную в ПОИ, получим на основе алгоритмов фильтрации Калмана [3]:

$$\hat{\alpha}_{pk} = \hat{\alpha}_{k/k-1} + K_k [\hat{\lambda}_k - h_k (\hat{\alpha}_{k/k-1})], \quad (10)$$

$$C^{-1}_{pk} = C^{-1}_{k/k-1} - K_k H_k C^{-1}_{k/k-1}, \quad (11)$$

$$K_k = C^{-1}_{k/k-1} H_k^T (H_k C^{-1}_{k/k-1} H_k^T + C^{-1}_{\lambda k})^{-1}, \quad (12)$$

$$C^{-1}_{k/k-1} = B_{k-1} C^{-1}_{k-1} B_{k-1}^T + Q_{k-1}, \quad (13)$$

где $\hat{\alpha}_{k/k-1} = B_{k-1} \hat{\alpha}_{k-1}$ – прогнозируемая оценка вектора состояния; K_k – матричный коэффициент усиления; $\hat{\lambda}_k = (\hat{\alpha}_{1k}^T, \hat{\alpha}_{2k}^T)^T$ – оценка вектора наблюдаемых параметров на входе ПОИ; $h_k (\hat{\alpha}_{k/k-1})$ – прогнозируемая оценка вектора наблюдаемых параметров; H_k, B_k, Q_k – известные матрицы.

Покажем схему алгоритма децентрализованной обработки информации в двухканальной измерительной системе (рис. 1).

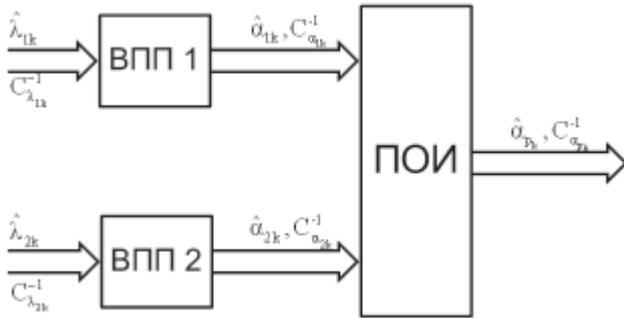


Рис. 1. Структурная схема децентрализованной системы обработки координатной информации

Элементы вектора состояния $\hat{\alpha}_{jk}$ представляют собой оценки координат объекта и оценки скорости их изменения в декартовой системе координат. Фильтрация оценок вектора состояния в пункте обработки информации может также производиться в декартовой системе координат. В данном случае блочная матрица статического пересчета H имеет следующую структуру:

$$H = \left(\frac{\partial \lambda^{(i)}}{\partial \alpha^{(j)}} \right)_{\alpha = \hat{\alpha}_{k/k-1}} = (I^T, I^T)^T, \quad (14)$$

где I – единичная матрица.

Корреляционная матрица ошибок текущего оценивания $C_{\lambda k}^{-1}$ имеет блочную структуру и в силу независимости и одновременности измерений в измерительных пунктах определяется выражением

$$C_{\lambda k}^{-1} = \begin{pmatrix} C_{1k}^{-1} & 0 \\ 0 & C_{2k}^{-1} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Матричный коэффициент усиления K_k после подстановки в формулу (12) соотношений (14), (15) преобразуется к виду

$$K_k = C_{\alpha k}^{-1} (I, I) \left[\begin{pmatrix} I \\ I \end{pmatrix} C_{\lambda k}^{-1} (I, I) + \begin{pmatrix} C_{1k}^{-1} & 0 \\ 0 & C_{2k}^{-1} \end{pmatrix} \right]^{-1}. \quad (16)$$

После проведенных математических выражение для матричного коэффициента усиления K_k принимает вид

$$K_k = (K_{11k}, K_{12k}), \quad (17)$$

где K_{11k}, K_{12k} – матричные коэффициенты усиления соответственно для первого и второго измерительных пунктов.

Результирующая корреляционная матрица ошибок измерений определяется как

$$C_k^{-1} = C_{\alpha k}^{-1} - \sum_{l=1}^2 K_{1lk} C_{\lambda k}^{-1} = \left(I - \sum_{l=1}^2 K_{1lk} \right) C_{\alpha k}^{-1}. \quad (18)$$

Результирующая оценка вектора состояния $\hat{\alpha}_k$ с учетом (16) имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_k &= \hat{\alpha}_{\alpha k} + (K_{11k}, K_{12k}) \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_{1k} \\ \hat{\alpha}_{2k} \end{bmatrix} - \begin{pmatrix} I \\ I \end{pmatrix} \hat{\alpha}_{\alpha k} = \\ &= \hat{\alpha}_{\alpha k} + (K_{11k}, K_{12k}) \begin{bmatrix} \hat{\alpha}_{1k} - \hat{\alpha}_{\alpha k} \\ \hat{\alpha}_{2k} - \hat{\alpha}_{\alpha k} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (19)$$

В более компактной форме выражение (19) можно представить в виде

$$\hat{\alpha}_k = \hat{\alpha}_{\alpha k} + \sum_{l=1}^2 K_{1lk} (\hat{\alpha}_{lk} - \hat{\alpha}_{\alpha k}). \quad (20)$$

В экстраполирующей результирующей оценке вектора состояния, сформированная в ПОИ, прогнозируется на следующий такт измерения. Невязка $v_{1k} = \hat{\alpha}_{1k} - \hat{\alpha}_{\alpha k}$, рассчитанная в каждом из измерительных пунктов приема, с установленным матричным весом добавляется к прогнозируемой оценке, что и дает результирующую оценку вектора состояния [3].

Алгоритм упрощенного фильтра Калмана (УФК), в оценке вектора состояния которого присутствуют оценки координат и скорости их изменения, называют УФК-алгоритмом, а алгоритм расширенного фильтра Калмана (РФК), в оценке вектора состояния которого имеется и оценка ускорения, – РФК-алгоритмом.

Рассмотрим следующие модификации фильтров сопровождения в декартовой системе координат:

- фильтрация в вынесенном приемном пункте (ВПП), УФК-фильтр + фильтрация в ПОИ, УФК-фильтр (УФК-УФК-алгоритм);
- фильтрация в ВПП, УФК-фильтр + фильтрация в ПОИ, РФК-фильтр (УФК-РФК-алгоритм);
- фильтрация в ВПП, РФК-фильтр + фильтрация в ПОИ, УФК-фильтр (РФК-УФК-алгоритм);
- фильтрация в ВПП, РФК-фильтр + фильтрация в ПОИ, РФК-фильтр (РФК-РФК-алгоритм).

Результаты имитационного моделирования приведены в виде графической зависимости среднеквадратической ошибки σ_x и ошибок оценивания Δ_x в метрах от номера такта измерения k для одной декартовой координаты X . Для двух других координат (Y и Z) результаты аналогичны.

Для полного анализа достаточно исследовать качество фильтрации оценок координат объекта при двух траекториях его движения:

- равномерном прямолинейном движении объекта в направлении на радиолокационную службу для выявления потенциальных возможностей;
- движением по окружности с заданной перегрузкой для выявления возможностей сопровождения маневрирующих объектов.

Рассмотрим качество фильтрации каждого алгоритма на этапе равномерного прямолинейного движения. Представив зависимости среднеквадратичной ошибки (СКО) и ошибки оценивания координаты X в метрах от такта измерения для всех предлагаемых к исследованию алгоритмов сопровождения (рис. 2). УФК-УФК-алгоритму соответствует кривая 1, РФК-РФК-алгоритму – кривая 2, УФК-РФК-алгоритму – кривая 3, РФК-УФК-алгоритму – кривая 4. Анализ приведенных графиков показывает, что УФК-УФК-алгоритм при слежении за неманеврирующим объектом имеет преимущество в точности сопровождения, СКО

оценивания в 1,5 раза меньше СКО алгоритмов, основанных на расширенных фильтрах Калмана. РФК–РФК-алгоритм имеет максимальные среднеквадратические ошибки. Это объясняется тем, что при сопровождении объекта, движущегося равномерно и прямолинейно в декартовой системе координат, учет второй производной (ускорения) в векторе состояния приводит к увеличению ошибок оценивания. УФК–РФК-алгоритм имеет результаты фильтрации оценок координат, сравнимые с УФК–УФК-алгоритмом. Это указывает на то, что применение в приемных пунктах фильтров с упрощенным вектором состояния позволяет получать высокие точности оценивания вектора состояния при сопровождении объектов с прямолинейной равномерной траекторией движения. РФК–УФК-алгоритм занимает промежуточное положение среди анализируемых алгоритмов.

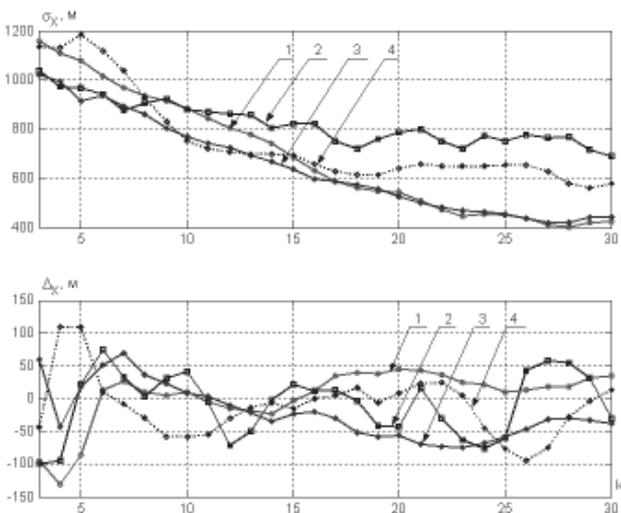


Рис. 2. Зависимость СКО σ_x и ошибок оценивания Δ_x координаты x для прямолинейного движения для модификаций УФК и РФК алгоритмов сопровождения

Таким образом, среднеквадратическая ошибка для УФК–УФК-алгоритма к десятому шагу фильтрации уменьшается в 1,2 раза, к двадцатому шагу – в два раза. Для модификации РФК–РФК результаты следующие: к десятому шагу фильтрации СКО уменьшается в 1,2 раза, а к двадцатому – в 1,4 раза. Иными словами, до десятого шага фильтрации результаты практически одинаковые, а потом фильтры сопровождения с упрощенным вектором состояния имеют значительный выигрыш в точности оценивания вектора состояния.

Работа рассматриваемых алгоритмов сопровождения имеет ряд особенностей. При сопровождении объектов используется несколько фильтров Калмана (см. рис. 1). Каждый из фильтров можно настраивать, учитывая особенности внешних и внутренних факторов, влияющих на точность оценивания. Основным элементом управления в фильтре Калмана является матрица дискретного маневра Q_k , физический смысл которой заключается в регулировании полосы пропускания фильтра. Необходимо выбрать такой нижний порог полосы пропускания фильтра, который позволит с минимальными ошибками оценивать координаты объекта и при этом не будет наблюдаться процесс расходимости фильтра. Если полоса пропус-

кания фильтра уменьшается, то фильтр при поступлении обновляющей информации начинает слабо реагировать на нее и в этом случае основной вес в результирующей оценке имеет прогнозированное значение оцениваемого параметра. Чрезмерное уменьшение полосы пропускания приводит к тому, что фильтр практически полностью доверяет прогнозированному значению, не принимая во внимание обновляющую информацию. В этом случае может наблюдаться процесс расходимости фильтра сопровождения, заключающийся в увеличении ошибок оценивания. В случае если ошибки оценивания значительно превышают ошибки первичных измерений, то речь идет о срыве сопровождения объекта.

Проведем анализ влияния полосы пропускания на качество фильтрации результирующей оценки вектора состояния на выходе ПОИ.

Данный анализ целесообразно провести при движении объекта по дуге окружности. Если полоса пропускания не адекватна протекающим процессам, то должно наблюдаться увеличение среднеквадратических ошибок оценивания координат объекта. Ширина полосы пропускания регулировалась путем изменения величины элементов матрицы дискретного маневра Q_k на два порядка. Необходимо отметить, что при моделировании изменялась полоса пропускания только того фильтра сопровождения, который используется в пункте обработки, в измерительных же пунктах ширина полосы пропускания фильтра оставалась неизменной.

Зависимости СКО и ошибок оценивания координаты X объекта при движении по окружности с перегрузкой, равной двум, приведены на рис. 3. Кривая 1 соответствует УФК–УФК-алгоритму с узкой полосой пропускания, кривая 2 – УФК–УФК-алгоритму с широкой полосой пропускания, кривая 3 – РФК–РФК-алгоритму с узкой полосой пропускания, кривая 4 – РФК–РФК-алгоритму с широкой полосой пропускания. УФК–УФК-алгоритм с узкой полосой пропускания имеет большие ошибки оценивания в момент маневра объекта, причем эти ошибки почти в два раза выше ошибок измерения первичных координат. При увеличении полосы пропускания ошибки оценивания уменьшаются и срыва сопровождения объекта не наблю-

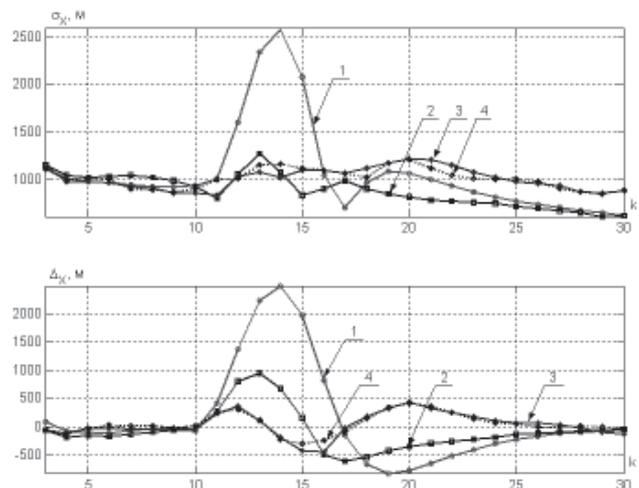


Рис. 3. Зависимость СКО σ_x и ошибок оценивания Δ_x координаты x при движении по окружности с перегрузкой, равной двум

дается. В случае использования РФК–РФК-алгоритма резкого увеличения ошибок оценивания не бывает в обоих случаях. Следует отметить, что данный алгоритм имеет высокие точностные характеристики при изменении полосы пропускания фильтра в широком диапазоне.

Кривые 3 и 4 (см. рис. 3) показывают, что ширина полосы пропускания фильтра в пункте обработки информации практически не влияет на точностные характеристики при сопровождении равномерно прямолинейно движущегося объекта, в силу этого обстоятельства прием полосы пропускания фильтра Калмана в пункте обработки широкой для всех предлагаемых к исследованию алгоритмов.

Анализ точностных характеристик алгоритмов сопровождения при движении объекта по окружности производился с перегрузкой, равной шести (рис. 4). На нем представлены зависимости СКО и ошибок оценивания от номера шага фильтрации k для УФК–УФК-алгоритма (кривая 1), УФК–РФК-алгоритма (кривая 2), РФК–УФК-алгоритма (кривая 3) и РФК–РФК-алгоритма (кривая 4). РФК–УФК и РФК–РФК-алгоритмы имеют лучшие точностные характеристики на участке маневра, однако при прямолинейном равномерном движении их СКО намного больше, СКО УФК–УФК и УФК–РФК-алгоритмов. Ошибка оценивания координаты x РФК–РФК-алгоритма в момент маневра составляет всего 250...300 м, в то время как остальные алгоритмы сопровождения имеют ошибки оценивания координаты объекта порядка 800...1 000 м. После окончания маневра через 7...10 тактов измерения среднеквадратические ошибки приближаются к СКО в установившемся режиме.

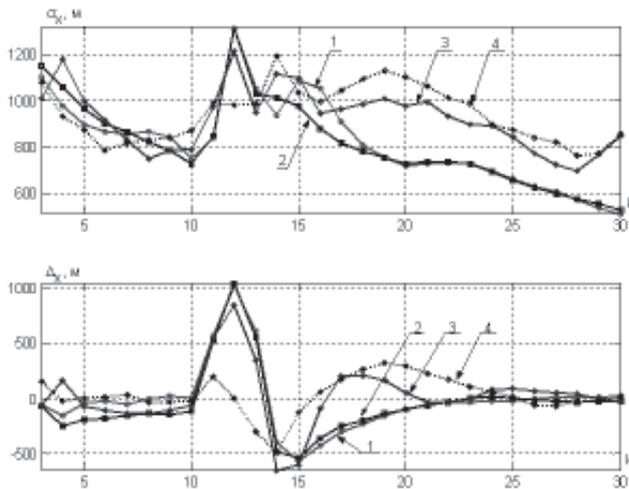


Рис. 4. Зависимость СКО σ_x и ошибок оценивания Δ_x координаты x при движении по окружности с перегрузкой, равной шести

Рассмотрим результаты моделирования для случая, когда в измерительных пунктах осуществляется фильтрация оценок вектора состояния объекта РФК-фильтрами, а в пункте обработки проводится комплексирование полученной от измерительных пунктов информации. Параметры фильтров в измерительных пунктах идентичны. Представим зависимость СКО и ошибки оценивания координаты X объекта при прямолинейном равномерном движении от номера такта измерения (рис. 5), причем кривая 1

соответствует комплексированию информации в ПОИ, а кривая 2 – обработке оценок вектора состояния объекта на основе алгоритмов фильтрации Калмана в ПОИ.

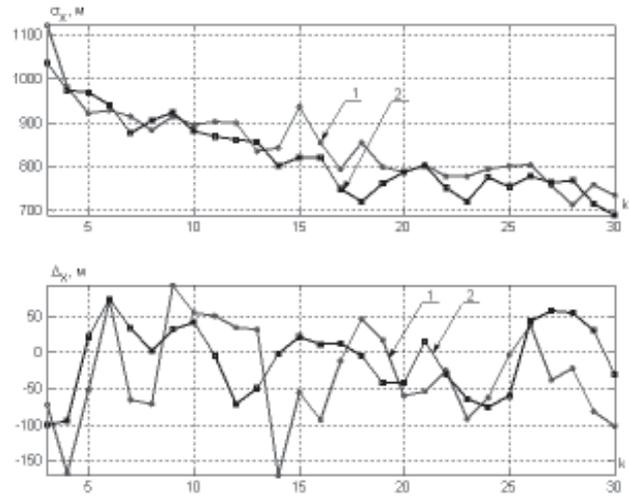


Рис. 5. Зависимость СКО σ_x и ошибок оценивания Δ_x координаты x при прямолинейном равномерном движении для Ф–О и Ф–Ф-алгоритмов (20)

Результаты фильтрации оценок координаты X практически одинаковы для обоих алгоритмов обработки. Среднеквадратическая ошибка к десятому шагу уменьшается в 1,22 раза, а к двадцатому – в 1,37 раза. Ошибки оценивания при фильтрации оценок вектора состояния объекта в пункте обработки информации изменяются более плавно, чем в случае их комплексирования.

Результаты фильтрации оценок координаты X при движении объекта по дуге окружности с перегрузкой, равной шести, представлены на рис. 6. Кривая 1 соответствует комплексированию информации, полученной от измерительных пунктов, кривая 2 – фильтрации в пункте обработки информации.

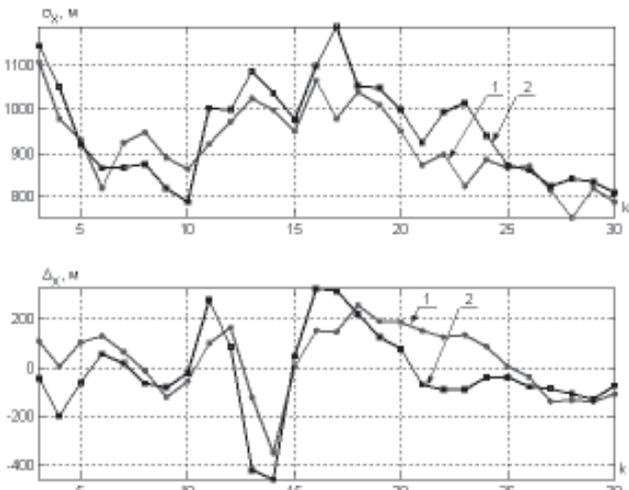


Рис. 6. Зависимость СКО σ_x и ошибок оценивания Δ_x координаты x при движении по окружности для Ф–О и Ф–Ф-алгоритмов (20)

В заключение можно сделать следующие выводы:

– анализ результатов моделирования функционирования УФК–УФК, УФК–РФК, РФК–УФК, РФК–РФК-алгоритмов показывает, что при прямолинейном равномер-

ном движении рекомендуется применять УФК–УФК-алгоритм, при маневре – РФК–РФК-алгоритм;

– среднеквадратичные ошибки при фильтрации в ПОИ оценок вектора состояния маневрирующего объекта соизмеримы с соответствующими СКО измерений. Кроме того, ошибки оценивания при маневрировании объекта в результате фильтрации оценок в ПОИ в 1,2 раза больше, чем в случае комплексирования оценок, а Ф–О-алгоритм требует значительно меньшей производительности вычислительных средств.

Таким образом при децентрализованной вторичной обработке информации в двухканальной измерительной системе целесообразно применять алгоритм комплексирования в ПОИ оценок векторов состояния измеритель-

ных пунктов, рассчитанных с применением алгоритма фильтрации Калмана.

Библиографический список

1. Гришин, Б. П. Динамические системы, устойчивые к отказам / Б. П. Гришин, Ю. М. Казаринов. М.: Радио и связь, 1985. 176 с.
2. Петров, А. В. Анализ и синтез радиотехнических комплексов / А. В. Петров, А. А. Яковлев; под ред. В. Е. Думвича. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
3. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.

N. P. Bogomolov

DECENTRALIZED ALGORITHMS OF INFORMATION PROCESSING IN TWO-CHANNEL MEASURE SYSTEMS

It is covered a decentralized algorithms of information processing in two-channel measure systems in case of an indirect measuring for different filtration algorithms of a condition vector estimation at the reception measure station and the station of information processing. Comparative analysis is carried out with a help of imitation modeling of synthesized algorithms.

Н. П. Богомолов, В. Г. Сидоров

ФИЛЬТРАЦИЯ ОЦЕНОК ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ В ДВУХПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Рассмотрены алгоритмы оценивания координат и параметров траектории движения цели в бистатической и двухпозиционной радиолокационной системе, основанные на применении искусственных нейронных сетей. Предложенные алгоритмы существенно превосходят по точности оценивания вектора состояния алгоритмы фильтрации Калмана.

Несмотря на значительный прогресс в разработке основных элементов и устройств радиолокационных систем (РЛС) (антенн, передатчиков, приемников, устройств обработки информации), случаях возросшие требования к ним не удается реализовать при использовании однопозиционной РЛС, поэтому возникает задача совершенствования принципов построения радиолокационных станций и систем.

Одним из перспективных направлений является переход от однопозиционных РЛС к многопозиционным радиолокационным системам (МП РЛС), состоящим из разнесенных в пространстве передающих и приемных пунктов (или однопозиционных РЛС), совместно ведущих радиолокационное наблюдение целей [1; 2]. В МП РЛС радиолокационная информация (РЛИ) используется более эффективно.

Анализ сведений, приведенных в отечественных и зарубежных работах, позволяет сделать вывод о том, что для реализации возможностей МП РЛС требуется решение комплекса взаимосвязанных теоретических и практических задач.

Значительное расширение практической реализации результатов теоретических исследований возникает благодаря внедрению в радиолокационное оборудование цифровых методов обработки сигналов. Эффективные результаты достигнуты в области разработки быстродействующих, устойчивых к вычислительным погрешностям алгоритмов вторичной обработки [3]. Анализ применения линейных рекуррентных алгоритмов оценивания координат цели в МП РЛС и вопросов повышения ее точностных характеристик за счет объединения координатной информации проводился в работах [1; 2].

Объединение этих направлений с централизованной вторичной обработкой информации позволяет создать оптимальную многопозиционную систему. Вместе с тем оптимальной многоканальной фильтрации присущи и следующие недостатки [3]:

- возможность работы только в централизованном режиме;
- большой объем вычислительных операций в пункте обработки информации для определения параметров траектории цели;
- необходимость передачи из приемных пунктов в пункт обработки информации всего объема получаемой информации;
- низкая живучесть;
- необходимость предварительного приведения оценок приемных пунктов к единой системе координат и т. д.

Построение оптимальной МП РЛС вызывает определенные трудности. Поэтому анализ известных и разработка новых алгоритмов децентрализованной вторичной обработки РЛИ для МП РЛС, обеспечивающих высокую точность оценивания координатной информации, является актуальной задачей.

В качестве многопозиционной радиолокационной системы авторы предлагают использовать двухпозиционную радиолокационную систему с децентрализованной вторичной обработкой РЛИ. Выбор такого упрощенного варианта системы обусловлен тем, что основные закономерности многопозиционного приема в полной мере проявляются и в двухпозиционной системе. При этом МП РЛС значительно проще в технической реализации. Кроме того, они сохраняют преимущества по повышению точности определения координат целей и помехозащищенности перед однопозиционными РЛС.

В представленной статье осуществляется анализ двух вариантов децентрализованной системы обработки координатной информации, состоящей из рекуррентных алгоритмов фильтрации координат цели, в вынесенных приемных пунктах (ВПП). В первом варианте обработки сглаженные оценки координат цели по линиям связи из ВПП передаются в пункт обработки информации (ПОИ), в котором осуществляется их комплексирование (ФО-алгоритм).

Во втором варианте повышение точности прогнозируемой оценки вектора состояния осуществляется за счет использования технологии искусственных нейронных сетей (ИНС) [5].

Алгоритм ФО используемый в *первом варианте*, основан на децентрализованной обработке данных [1; 4]. Рациональное распределение этапов обработки РЛИ позволяет сократить часть вычислительных затрат путем перехода к многомашинной вычислительной структуре. Непосредственное сопряжение ЭВМ с каждым приемным пунктом дает возможность уменьшить число вычислений в ПОИ путем частичной обработки информации на месте [4].

Первый этап децентрализованной обработки реализуется непосредственно на ВПП и заключается в самостоятельном определении оценки вектора состояния $\hat{\alpha}_k$ по каждой из совокупностей оценок вектора наблюдаемых параметров $\hat{\lambda}_k$, где k – номер такта измерения.

Модель косвенного измерения координат аэродинамической цели является линейной:

$$\lambda_k = h_k [\alpha_k] + \delta_k, \quad (1)$$

где $h[\alpha_k]$ – нелинейная функция пересчета вектора состояния в вектор наблюдаемых параметров; δ_k – вектор

ошибок измерений, элементы которого являются белым шумом.

В настоящее время общая теория оптимальных методов статистической обработки информации в нелинейных задачах разработана достаточно хорошо [1], однако практическое применение результатов этой теории сопряжено с большими трудностями. В связи с этим часто отдают предпочтение построению субоптимальных фильтров, рационально сочетая необходимую эффективность их функционирования и допустимую сложность применительно к решению практических задач.

В качестве приближенных рекуррентных алгоритмов нелинейного оценивания часто применяются различные модификации линейных рекуррентных алгоритмов. Фильтры Калмана (ФК) в классе линейных рекуррентных алгоритмов обеспечивают оценивание вектора состояния динамического объекта с минимальной среднеквадратической ошибкой (СКО).

В основу построения алгоритмов фильтра Калмана положены концепции предсказания координат цели и коррекции этих координат на основе полученных данных. При использовании линеаризованных фильтров Калмана качество оценки вектора состояния во многом зависит от близости оценки и истинного значения вектора состояния. Поэтому расчет $h_k[\alpha_k]$ целесообразнее проводить относительно оценки, полученной к моменту поступления очередного измерения.

Алгоритмы дискретного фильтра Калмана могут быть представлены в следующем виде:

– алгоритм оценивания вектора состояния

$$\hat{\alpha}_k = \hat{\alpha}_{k/k-1} + K_k [\hat{\lambda}_k - h_k[\hat{\alpha}_{k/k-1}]]; \quad (2)$$

– алгоритм одношагового предсказания

$$\hat{\alpha}_{k/k-1} = B_{k-1} \hat{\alpha}_{k-1}; \quad (3)$$

– вычисление матричного коэффициента усиления

$$K_k = C_k^{-1} H_k^T C_{\lambda k}; \quad (4)$$

– алгоритм вычисления апостериорной матрицы ошибок измерений вектора состояния

$$C_k^{-1} = (C_{k/k-1} + H_k^T C_{\lambda k} H_k)^{-1}; \quad (5)$$

– алгоритм вычисления априорной матрицы ошибок измерений вектора состояния

$$C_{k/k-1}^{-1} = B_{k-1}^{-1} C_{k-1}^{-1} B_{k-1}^T + Q_{k-1}; \quad (6)$$

где $h_k[\hat{\alpha}_{k/k-1}]$ – пересчет прогнозированной оценки вектора состояния в сферическую систему координат; B_k, H_k, Q_k – известные матрицы.

Вычисления, произведенные с помощью уравнений фильтрации (2)...(6), осуществляются на основании результатов двух первых радиолокационных измерений: $\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2$ – для упрощенного фильтра Калмана (УФК) и трех измерений: $\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_2, \hat{\lambda}_3$ – для расширенного фильтра Калмана (РФК). Это связано с необходимостью вычисления оценок скорости $\hat{v}_{xk}, \hat{v}_{yk}, \hat{v}_{zk}$ для УФК и дополнительно оценок ускорений $\hat{s}_{xk}, \hat{s}_{yk}, \hat{s}_{zk}$ для РФК. Составляющие оценки вектора состояния могут быть рассчитаны только на основании оценок вектора наблюдения, полученного в различные моменты времени. Матричный коэффициент усиления K_k и матрица дисперсий ошибок оценивания вектора состояния C_k^{-1} для обобщенного фильтра Калмана не могут быть вычислены заранее. Вычисление этих величин должно происходить в реальном масштабе времени, так как они, в соответствии с процедурой линеаризации, зависят от текущей оценки вектора состояния $\hat{\alpha}_k$.

Выражения (2)...(6) описывают алгоритмы получения оценки вектора состояния $\hat{\alpha}_k$ и корреляционной матрицы ошибок измерения C_k^{-1} в момент поступления данных на k -м шаге.

Разность между текущей и прогнозируемой оценкой вектора наблюдаемых параметров равна

$$v_k = \hat{\lambda}_k - h_k[\hat{\alpha}_{k/k-1}]. \quad (7)$$

Величина v_k , которую называют невязкой, умножается на матричный коэффициент усиления K_k , в результате чего формируется сигнал коррекции. Далее этот сигнал суммируется с предсказанной оценкой вектора состояния $\hat{\alpha}_{k/k-1}$, в результате чего получается оценка вектора состояния в ВПП.

Оценки вектора состояния в ВПП представлены в единой форме записи и привязаны к одному моменту времени. Для формирования результирующей оценки век-

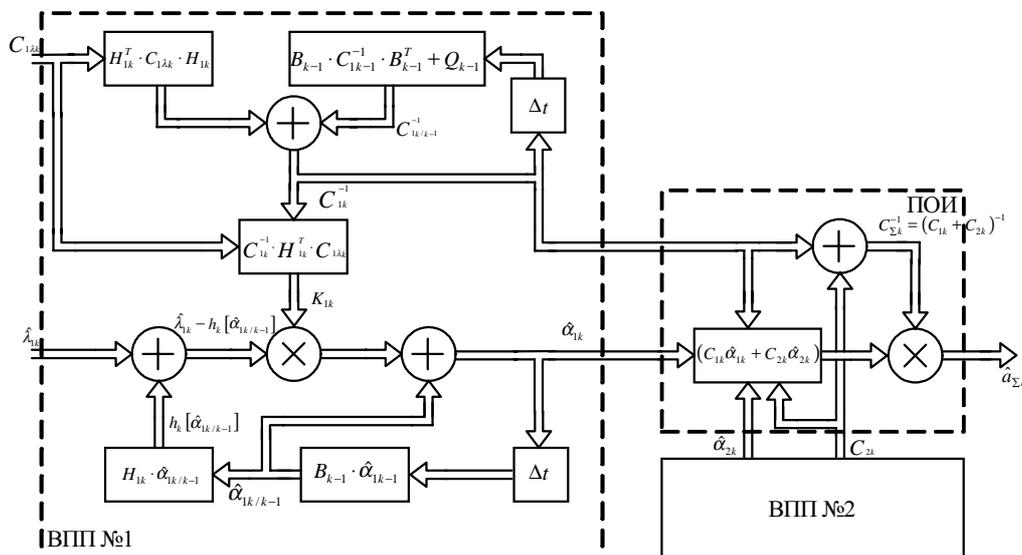


Рис. 1. Структурная схема алгоритма ФО

тора состояния $\hat{\alpha}_{\Sigma k}$ необходимо иметь статистические характеристики отдельных оценок. Исчерпывающей статистической характеристикой каждой оценки параметров траектории является ее ковариационная матрица C_{ik} . Результирующая оценка вектора состояния сводится к выполнению простой операции статистического согласования [4]

$$\hat{\alpha}_{\Sigma k} = C_{\Sigma}^{-1} (C_{1k} \hat{\alpha}_{1k} + C_{2k} \hat{\alpha}_{2k}), \quad (8)$$

где $\hat{\alpha}_{1k}, \hat{\alpha}_{2k}$ – оценки вектора состояния в 1-м и 2-м ВПП; C_{1k}, C_{2k} – соответствующие корреляционные матрицы точности; $C_{\Sigma}^{-1} = (C_{1k} + C_{2k})^{-1}$ – результирующая матрица ошибок.

Схема реализующая алгоритм децентрализованной обработки данных (2)...(6), (8), имеет следующий вид (рис. 1).

Повышение точности прогнозирования во *втором варианте* алгоритма вторичной обработки РЛИ приводит к созданию нового фильтра с нейронной сетью на основе фильтра Калмана (ФНС). В ФНС происходит замена прогнозируемого значения фильтра Калмана $B_{k-1} \hat{\alpha}_{k-1}$ на прогнозируемое значение, сформированное нейронной сетью. В остальном работа фильтра осталась неизменной.

Разработанный дискретный фильтр отличается от обычного ФК (2)...(6) только алгоритмом одношагового предсказания (3):

$$\hat{\alpha}_{k/k-1} = \hat{\alpha}_{k-1} + \Delta \hat{\alpha}_{\dot{y}k}. \quad (9)$$

Матричный коэффициент усиления K_k и матрица дисперсий ошибок оценивания вектора состояния C_k^{-1} для ФНС, как и для фильтра Калмана, не могут быть рассчитаны заранее. Вычисление должно происходить в ре-

альном масштабе времени, так как эти величины зависят от текущей оценки вектора состояния $\hat{\alpha}_k$.

Выражения (2), (4)...(9) описывают алгоритмы получения оценки вектора состояния $\hat{\alpha}_k$ и корреляционной матрицы ошибок измерения C_k^{-1} в момент поступления данных на k -м шаге (рис. 2). Выражение $\hat{\alpha}_{k/k-1}$ соответствует экстраполяции оценки вектора состояния, полученной на предыдущем шаге.

Формирование начальных данных для работы нейронной сети и вычисление прогнозированной оценки вектора состояния осуществляется следующим образом.

Оценка вектора наблюдаемых параметров $\hat{\lambda}_k$, поступающая на каждом такте измерения, и отфильтрованная оценка вектора состояния $\hat{\alpha}_{k-1}$ позволяют сформировать вектор

$$\Delta \hat{\alpha}_{jk} = (Z_k(\hat{\lambda}_k) - \hat{\alpha}_{k-1}) \quad (10)$$

между текущей оценкой $Z_k(\hat{\lambda}_k)$ вектора наблюдения, пересчитанной в декартову систему координат и отфильтрованной оценкой вектора состояния на предыдущем $(k-1)$ шаге фильтрации $\hat{\alpha}_{k-1}$. При использовании обученной сети в ФНС вычисление $\Delta \hat{\alpha}_{jk}$ возможно с использованием оценок координат вектора состояния вместо вектора наблюдений. При этом необходимо, чтобы последний вектор $\Delta \hat{\alpha}_{jk}$ вычислялся с использованием принятого вектора наблюдений на k -м шаге. Данный вектор поступает на вход нейронной сети с предыдущими тремя векторами $\Delta \hat{\alpha}_{jk} = [\Delta \hat{\alpha}_{4k}; \Delta \hat{\alpha}_{3k}; \Delta \hat{\alpha}_{2k}; \Delta \hat{\alpha}_{1k}]^T$. На выходе нейронной сети формируется значение следующего вектора $\Delta \hat{\alpha}_{\dot{y}k} = (\Delta \hat{x}_{\dot{y}k}, \Delta \hat{y}_{\dot{y}k}, \Delta \hat{z}_{\dot{y}k})^T$ и определяется оценка вектора состояния координат цели, состоящая из оценок вектора координат

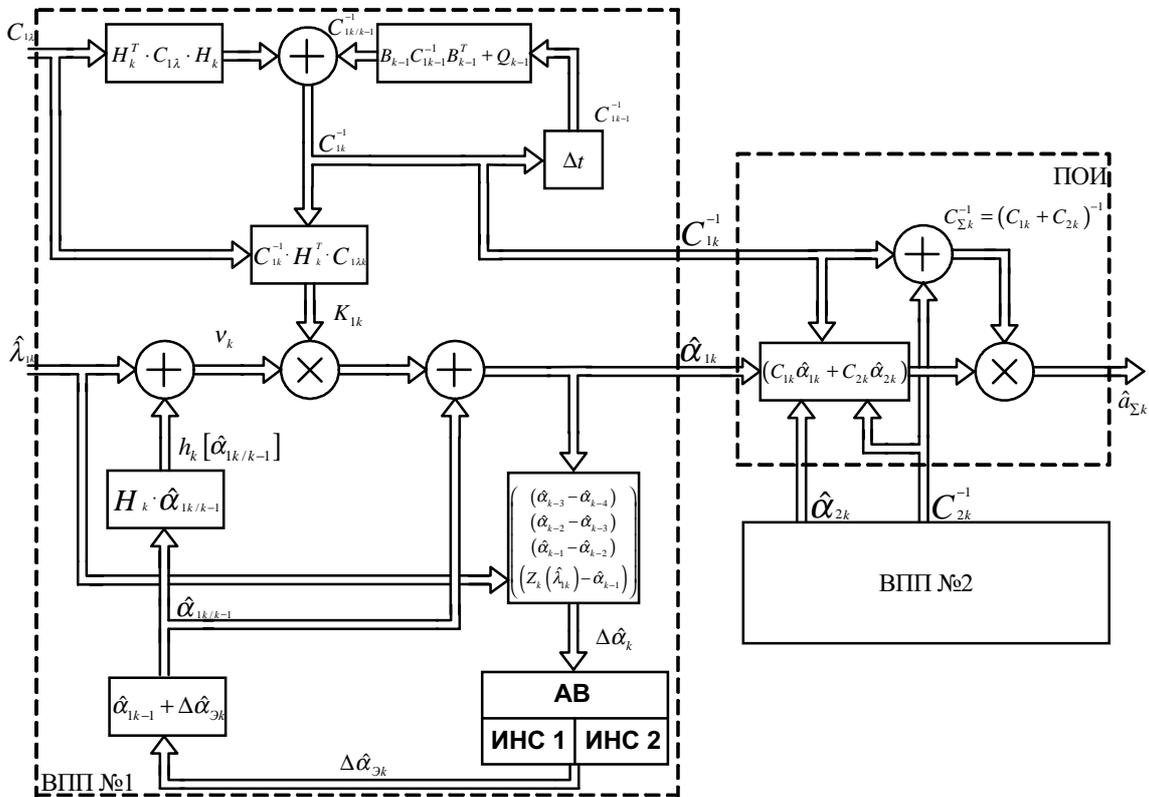


Рис. 2. Структурная схема алгоритма ФО-ФНС. АВ – алгоритм выбора; ИНС1 – нейронная сеть, обученная на равномерное прямолинейное движение цели; ИНС2 – нейронная сеть, обученная на движение цели с маневрами

$$\alpha_{k/k-1}(1:3) = \begin{pmatrix} \hat{x}_{k/k-1} \\ \hat{y}_{k/k-1} \\ \hat{z}_{k/k-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{x}_{k-1} \\ \hat{y}_{k-1} \\ \hat{z}_{k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta\hat{x}_{\dot{y}_k} \\ \Delta\hat{y}_{\dot{y}_k} \\ \Delta\hat{z}_{\dot{y}_k} \end{pmatrix} \quad (11)$$

и оценок вектора скоростей

$$\hat{\alpha}_{k/k-1}(4:6) = \begin{pmatrix} \hat{v}_{xk/k-1} \\ \hat{v}_{yk/k-1} \\ \hat{v}_{zk/k-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\hat{x}_{\dot{y}_k}/T \\ \Delta\hat{y}_{\dot{y}_k}/T \\ \Delta\hat{z}_{\dot{y}_k}/T \end{pmatrix}, \quad (12)$$

соответствующих k -му такту измерений. Этот вектор аналогичен вектору прогнозируемого значения $\hat{\alpha}_{k/k-1}$, который вычисляется в упрощенном фильтре Калмана. Он содержит прогнозируемые оценки координат и скоростей цели.

Разработанный ФНС-алгоритм оценивания координат цели может быть использован в МП РЛС аналогично фильтру Калмана в ФО-алгоритме. В ФО-алгоритме результирующая оценка вектора состояния $\hat{\alpha}_{\Sigma k}$ на выходе ПОИ формируется путем комплексирования оценок векторов состояния $\hat{\alpha}_{1k}$ и $\hat{\alpha}_{2k}$. Комплексирование оценок координат цели, вычисленных в вынесенных приемных пунктах по ФО-ФНС-алгоритму, происходит в ПОИ по алгоритму (8).

Структурная схема ФО-ФНС-алгоритма (см. рис. 2) аналогична структурной схеме алгоритма ФО (см. рис. 1), за исключением блока, рассчитывающего $\Delta\hat{\alpha}_k$, и блока АВ, определяющего в зависимости от модели движения, какая ИНС должна прогнозировать $\Delta\hat{\alpha}_{\dot{y}_k}$: ИНС1 обучена на прогнозирование вектора $\Delta\hat{\alpha}_{\dot{y}_k}$ при оценивании координат цели, летящей равномерно прямолинейно, ИНС2 применяется если цель движется – с маневрированием по направлению или скорости.

Моделирование работы алгоритма фильтрации ФНС в двухпозиционной радиолокационной системе (ФО–ФНС) позволило провести сравнительный анализ между алгоритмами фильтрации ФО и ФО–ФНС.

Проведенное имитационное моделирование ставило перед собой задачу исследования эффективности применения линейных рекуррентных алгоритмов фильтрации с целью повышения точности оценивания координат аэродинамической цели. Результаты моделирования процесса оценивания координат аэродинамической цели с помощью алгоритмов фильтрации ФО (кривые 1) и ФО–ФНС (кривые 2) представлены на графиках зависимости СКО фильтрации координат цели от номера шага фильтрации в декартовой системе координат (рис. 3...5).

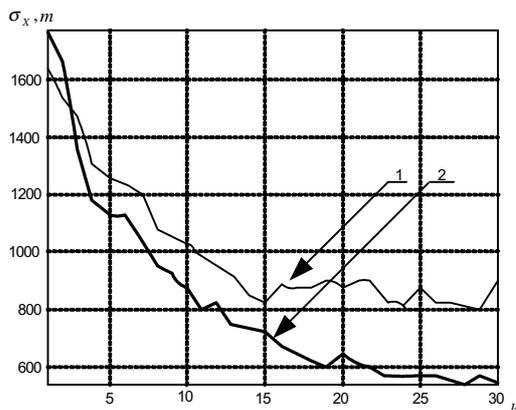


Рис. 3. Зависимость СКО оценивания по координате X при равноускоренном движении

Применение синтезированного алгоритма ФО–ФНС повышает точность оценивания по отношению к известному ФО-алгоритму на 20...40% в установившемся режиме.

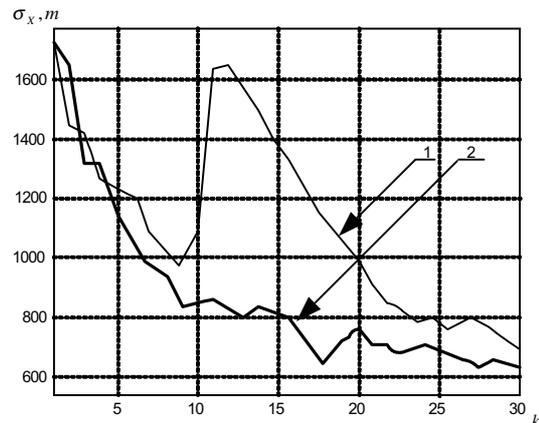


Рис. 4. СКО оценивания по координате X при маневрировании по скорости

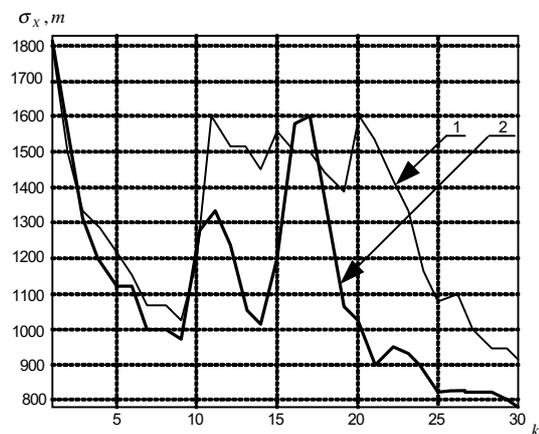


Рис. 5. СКО оценивания по координате X при маневрировании по направлению

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Применение децентрализованного алгоритма обработки РЛИ (ФО) позволяет повысить точность оценивания координат цели по сравнению с бистатической РЛС на 20...30%.
2. Исследование применения нейрокompьютерных алгоритмов ИНС в радиолокации позволяет сделать вывод о возможности ее использования для повышения точности оценивания координат цели в ВПП.
3. Разработанный алгоритм вторичной обработки РЛИ с применением искусственных нейронных сетей (ФНС) позволяет повысить точность оценивания координат цели за счет повышения точности прогнозируемой оценки вектора состояния по сравнению с ФК на 20...40%.
4. Проведенный анализ чувствительности и устойчивости алгоритма ФНС к изменению внешних и внутренних параметров показал, что разработанный фильтр позволяет следить за целью во всем диапазоне скоростей и на всех видах траекторий и маневров, которые были учтены в задачнике на этапе обучения НС.
5. Полученные результаты в ходе сравнительного статистического анализа алгоритмов децентрализованной обработки (ФО, ФО–ФНС) позволяют сделать вывод о том, что

повышение точности оценивания координатной информации в установившемся режиме для ФО–ФНС-алгоритма по сравнению с ФО-алгоритмом составляет 20...40%.

Библиографический список

1. Фарина, А. Цифровая обработка радиолокационной информации / А. Фарина, Ф. Студер. М.: Радио и связь, 1993. 319 с.
2. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.

3. Кузьмин, С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. М.: Сов. радио, 1974. 432 с.

4. Петров, А. В. Анализ и синтез радиотехнических комплексов / А. В. Петров, А. А. Яковлев. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.

5. Татузов, А. Л. Использование нейросетевой технологии при обработке радиолокационной информации / А. Л. Татузов, Ф. С. Чухлеб // Информационные технологии. 1999. № 1. С. 25–30.

N. P. Bogomolov, V. G. Sidorov

STATE VECTOR ESTIMATION FILTERING IN TWO-POSITION RADIO-LOCATING SYSTEM USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Estimating algorithms of coordinates and parameters of target motion path in bistatic and two-position radio-locating system based on artificial neural networks usage are observed. Offered algorithms greatly exceed Kalman filtering algorithms in precision of estimate of state vector.

Е. Б. Бурулёв, Е. А. Зайцева, А. В. Медведев

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Рассматривается задача моделирования дискретно-непрерывных процессов в обстановке случайных факторов и различного рода неопределенностей. При необходимости моделирования организационных процессов предлагается использовать декомпозицию рассматриваемой системы в зависимости от возможности ее математической формализации. Обсуждается задача моделирования в узком и широком смыслах, а также некоторые особенности идентификации организационных процессов.

Общая постановка задачи идентификации дискретно-непрерывных и организационных процессов. Введем следующие обозначения: $x(t)$ – выходная переменная процесса, которую без нарушения общности можем считать скалярной; $u(t)$ и $\mu(t)$ – соответственно управляемая и неуправляемая контролируемые переменные; $\omega(t)$ – неконтролируемая переменная, действующая на процесс (о ее существовании исследователь может и не знать); $\xi(t)$ – случайные возмущения; t – время. Таким образом, переменная $x(t)$ может быть представлена в виде объективно существующей зависимости

$$x(t) = A(u(t), \mu(t), \omega(t), \xi(t), t), \quad (1)$$

где A – неизвестный оператор процесса; $u(t) \in R^k$; $\mu(t) \in R^m$; $\omega(t) \in R^n$; $\xi(t) \in R^\lambda$.

Измерение переменных $x(t)$, $u(t)$ и $\mu(t)$ осуществляется со случайными ошибками, имеющими нулевое математическое ожидание и ограниченную дисперсию, плотность их вероятности неизвестна. Обозначим эти наблюдения как $x_t, u_t, \mu_t, t = 1, 2, \dots$, здесь t – дискретное время. Существенно, что оператор $A(\cdot)$ не зависит от t , т. е. он не изменяется во времени.

При моделировании подобных процессов преследуется цель построения математической модели

$$\tilde{x}(t) = B(u(t), \mu(t), t), \quad (2)$$

где B – класс операторов, который определяется на основе имеющейся априорной информации; $\tilde{x}(t)$ – выход модели. Ясно, что в этом случае стремятся к тому, чтобы $\tilde{x}(t)$ был близок к $x(t)$ в смысле принятого критерия оптимальности. Очевидно, что модель (2), описывающая процесс (1), может быть удовлетворительной, если класс операторов B выбран удачно и если влияние $\omega(t)$ и случайных факторов, действующих на процесс и в каналах измерения, не существенно. При существенном влиянии на $x(t)$ переменной $\omega(t)$ или значительном влиянии случайных факторов удовлетворительную модель процесса построить нельзя. Описанная ситуация является типичной не только для разнообразных технологических процессов, но и для многих других. Проблема моделирования подобных процессов усугубляется недостатком априорной информации об операторе A и высокой размерностью переменных $u(t)$ и $\mu(t)$.

Существенной особенностью моделирования организационных процессов является наличие действующих на процесс факторов (назовем их влиянием внешней среды), которые порождают состояние неопределенности. В этом случае на процесс (объект) действует еще одна переменная $\theta(t)$, уравнение (1) примет вид

$$x(t) = A(u(t), \mu(t), \omega(t), \xi(t), \theta(t), t), \quad (3)$$

а общая схема подобного процесса может быть изображена следующим образом (рис. 1) (h^μ, h^u, h^x – случайные ошибки измерения соответственно $\mu(t), u(t)$ и $x(t)$).

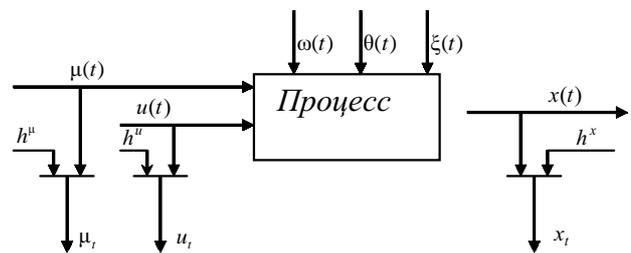


Рис. 1

Идентификация в условиях неполной информации.

При моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в узком смысле. Ее содержание состоит в том, что на первом этапе каким-то образом определяется параметрический класс операторов B , например:

$$\tilde{x}_\beta(t) = B^\beta(u(t), \mu(t), t, \beta), \quad (4)$$

а на втором этапе осуществляется оценка параметров β на основе имеющейся выборки $\{x_t, u_t, \mu_t, t = 1, S\}$, где S – объем выборки. Успех решения задачи идентификации в этом случае существенно зависит от того, насколько удачно определен оператор (4).

Идентификация в широком смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора (4), если, конечно, для этого нет достаточных априорных сведений. Часто оказывается значительно проще определить класс операторов (2) на основе сведений качественного характера, например линейности процесса или типа нелинейности, однозначности либо неоднозначности и др. В этом случае задача идентификации состоит в оценивании этого оператора на основе выборки $\{x_t, u_t, \mu_t, t = 1, S\}$ в форме

$$\tilde{x}_s(t) = B_s(u(t), \mu(t), t, \vec{x}_s, \vec{u}_s, \vec{\mu}_s), \quad (5)$$

где $\vec{x}_s = (x_1, x_2, \dots, x_s)$, $\vec{u}_s = (u_1, u_2, \dots, u_s)$, $\vec{\mu}_s = (\mu_1, \dots, \mu_s)$ – временные векторы. Для некоторых классов операторов теория идентификации в широком смысле была развита на основе методов непараметрической статистики. В этом случае формулы типа (5) являются непараметрическими моделями процесса (1). Эта теория была развита для многосвязных процессов с запаздыванием, линейных динамических процессов с запаздыванием и некоторых классов нелинейных динамических процессов.

Моделирование организационных процессов. Организационные процессы – это любые процессы, протекающие с участием человека. К ним можно отнести процессы, функционирующие в экономике, социологии, производственных отношениях, технике и др., а также управляющие процессы в различных областях деятельности человека. Для подобных организационных систем характерно наличие различного рода неопределенностей (не путать со случайностью!), которые неизбежно затрудняют математическую формулировку задач моделирования и управления, а во многих случаях делают ее просто невозможной. Существенная трудность моделирования таких процессов обусловлена еще и тем, что элементом процесса является человек. В этом случае схему, представленную выше, следует несколько видоизменить. Представим схему наблюдения активной организационной системы (рис. 2), характер зависимости которой может быть описан следующим образом:

$$x(t) = A(u(t), \mu(t), \omega(t), \xi(t), \theta(t), \lambda(t), t), \quad (6)$$

где обозначения всех переменных те же, что и в (3), а $\lambda(t)$ – переменная, определяющая поведение человека, которая также может быть измерена или оценена. В этом случае модель процесса (6) выглядит следующим образом:

$$\tilde{x}_p(t) = B^p(u(t), \mu(t), \lambda(t), t, \beta), \quad (7)$$

если задача идентификации рассматривается в узком смысле, и в виде

$$\tilde{x}_s(t) = B_s(u(t), \mu(t), \lambda(t), t, \tilde{x}_s, \tilde{u}_s, \tilde{\mu}_s, \tilde{\lambda}_s), \quad (8)$$

если задача идентификации рассматривается в широком смысле.

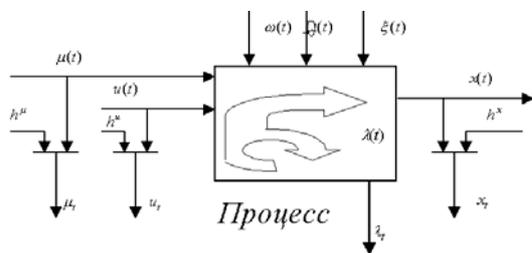


Рис. 2

Наиболее естественный путь моделирования организационных процессов состоит в предварительной декомпозиции, причем выявление фрагментов исследуемого процесса осуществляется исходя из возможностей его математической формализации. Те же фрагменты, которые не поддаются последней, отдаются на «откуп» лицу, принимающему решение (ЛПР). При моделировании подбъектов (фрагментов), для которых возможна математическая постановка задачи, можно использовать модели и алгоритмы, изложенные выше. Но следует иметь в виду, что переход от содержательной характеристики задачи к ее математической формализации часто чрезвычайно труден, а сам этот процесс не формализуем.

Остановимся еще на одном факте, который обычно бывает на практике. Сущность проблемы состоит в том, что исследователь часто не имеет выборки наблюдений той или иной переменной такого объема, который достаточен для того, чтобы сделать устойчивый статистический вывод, а иногда он вообще не имеет измерений инте-

ресующего его параметра (подобная ситуация, собственно, и породила проблему малых выборок). Моделирование организационных процессов в этих условиях осуществляется на основе современной теории идентификации с той лишь разницей, что алгоритмы идентификации (модели) используются в модифицированном виде, адекватном существованию исследуемого процесса.

При построении моделей дискретно-непрерывных процессов мы неизбежно сталкиваемся с ситуацией, когда характеристика исследуемого процесса изменяется во времени заранее не предвиденным образом. Таким образом, с точки зрения практики, оператор A в (1) не является неизменным во времени, как мы предполагали ранее, а исследуемые процессы относятся к типу нестационарных. Последнее обстоятельство кардинально изменяет ситуацию, а именно: выборки наблюдений уже не должны быть чрезмерно большими; использование старых наблюдений перестает быть целесообразным, так как сегодняшняя картина процесса уже иная; об асимптотической сходимости алгоритмов вообще говорить не имеет смысла, да и сама теория сходимости в современном виде в значительной степени утрачивает свое значение. Но, тем не менее, ничего страшного в этом нет, так как исследователи-практики хорошо знают время жизни моделей, которые они разработали, и своевременно их перестраивают, оценив время разладки системы, используя при этом, например, идею скользящего усреднения или иные приемы. Можно считать без преувеличения, что существующая теория идентификации и управления является стационарной, нестационарной теории просто нет, а есть лишь методики или приемы отслеживания изменчивости характеристик процесса, которые вызваны старением оборудования, технологических аппаратов, изменениями, связанными с $\omega(t)$ и $\theta(t)$ (см. рис.1) и другими причинами. Для модели стохастического статистического процесса в этом случае следует использовать статистику

$$y_s(x) = \frac{1}{s C_s^m} \sum_{i=1}^s y_i \prod_{j=1}^m H\left(\frac{x_j - x_j^i}{C_s}\right) \rho(s-i), \quad (9)$$

где $\rho(s-i)$ – функция памяти, убывающая с ростом аргумента:

$$\rho(0) \geq \rho(1) \geq \dots \geq \rho(s-1). \quad (10)$$

Знак равенства в (10) возможен, например, в случае скользящего усреднения с одинаковым весом. Этот прием легко обобщается на другие задачи адаптации и обучения.

В случае отсутствия выборки наблюдений входа-выхода для организационного процесса (или его фрагмента) могут быть привлечены специалисты-эксперты. Их задача сводится к тому, чтобы на основе заданных (или каким-то образом определенных) значений вектора входных переменных $x = (x_1, \dots, x_m)$ дать (назвать) количественно определенное значение отклика системы на основе собственного опыта и знаний. Таким образом может быть сформулирована выборка \tilde{y}_s, \tilde{x}_s , которая используется для построения соответствующей модели. Влияние человеческого фактора, присущего этой выборке, найдет свое отражение и в модели, но в будущем, по мере того как моделирующая система будет пополняться

ся уже объективными значениями наблюдений входа-выхода, модель должна корректироваться или обучаться.

Одной из наиболее сложных черт организационных процессов (напомним, что это процессы, протекающие с участием человека, коллектива и т. д.) является его замкнутость. В теории управления замкнутыми системами называют систему «объект–управляющее устройство (УУ)», которая охвачена обратной связью. При этом УУ рассчитывает управляющее воздействие, которое подается на объект, в зависимости от значения выходной величины объекта и его желаемого значения. В технике такую систему часто можно «разорвать» и объект исследовать независимо от УУ. В организационных системах это невозможно, потому что человек (коллектив) всегда находится под воздействием соответствующих управлений (регламент поведения, традиции, законы и т. д.)¹.

Непараметрические алгоритмы принятия решений.

Теория непараметрических систем своему становлению и развитию обязана проблеме, состоящей в необходимости решения различных задач адаптации в условиях, когда уравнение исследуемого процесса не определено с точностью до вектора параметров.

Пусть $\vec{q}[t] \in R^n$, $\vec{u}[t] \in R^k$, $\vec{z}[t] \in R^m$ – векторы наблюдаемых случайных последовательностей, представляющие собой соответственно выходные и входные переменные исследуемого процесса. Определим функцию решений $\hat{r} \in L^2$ как некоторую функцию, являющуюся выходом (решением) адаптивной системы, а функцию отклика $\omega \in L^2$ будем рассматривать как реакцию исследуемого процесса на \hat{r} . Функция ω поступает на вход адаптивной системы.

В дальнейшем в наблюдаемых переменных индекс h (помехи при измерении) – по соображениям простоты будет опущен. Помехи h и ξ таковы, что $M\{h\} = 0$, $D\{h\} < \infty$, $M\{\xi\} = 0$, $D\{\xi\} < \infty$. Сформируем критерий оптимальности

$$R(\hat{r}) = M_{\omega} \{M_r \{Q(r, \hat{r}) | \omega\}\}, \quad (11)$$

где $Q(\cdot)$ – некоторая выпуклая функция. Задача отыскания наилучшего \hat{r} сводится к минимизации $R(\hat{r})$ по \hat{r} , т. е. к поиску такого $\hat{r}_{\text{опт}}$, что

$$R(\hat{r}_{\text{опт}}) = \frac{\min}{\hat{r}} R(\hat{r}).$$

Ясно, что вид \hat{r} будет определяться видом функции $Q(r, \hat{r})$. Если $Q(r, \hat{r}) = (r - \hat{r})^2$, то

$$\hat{r}(\omega) = M\{r | \omega\}. \quad (12)$$

В дальнейшем необходимо оценить $r(\omega)$ по наблюдениям $\vec{r}[s]$, $\vec{\omega}[s]$, которые формируются из исходных выборок $\vec{q}[t]$, $\vec{u}[t]$. Знак \rightarrow означает временной вектор.

При пассивном накоплении информации, т. е. при наличии выборок $\vec{r}[s]$, $\vec{\omega}[s]$, непараметрический алгоритм оценивания (12) имеет вид

$$\tilde{G}_t^s = G_s \Phi_t^s, \quad (13)$$

где матрицы $\tilde{G}_t^s, G_s, \Phi_t^s$ таковы, что

$$\begin{aligned} \|\tilde{G}_t^s\|^T &= \|r_1[t], \dots, r_k[t]\|, \quad \|\Phi_t^s\|^T = \|p_1[1], \dots, p_1[s]\|, \\ G_s &= \begin{bmatrix} r_1[1] & \dots & r_1[s] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_k[1] & \dots & r_k[s] \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (14)$$

$p_i[j] = \prod_{v=1}^n \Phi(C_s^{-1}(\omega_v[t] - \omega_v[j])) / \sum_{i=1}^s \prod_{v=1}^n \Phi(C_s^{-1}(\omega_v[t] - \omega_v[j]))$, T – знак транспонирования.

При активном накоплении информации алгоритм оценивания (12) имеет вид

$$\tilde{G}_t^s = G_s \Phi_t^s + \Delta_{s+1}, \quad (15)$$

где матрица Δ_{s+1} , удовлетворяющая условиям сходимости,

$$\Delta_{s+1}^T = \|\Delta_{r_1}[s+1], \dots, \Delta_{r_k}[s+1]\|. \quad (16)$$

Элементы этой матрицы представляют собой поисковые шаги, которые обеспечивают процесс обучения адаптивной модели. Алгоритм (15) имеет простой физический смысл, который состоит в том, что первое слагаемое представляет собой знание об объекте, а второе слагаемое обеспечивает поиск (обучение), если этого знания недостаточно. Таким образом, в начале процесса обучения доминирующее значение имеет второе слагаемое Δ_{s+1} , а по мере возрастания степени обучения системы усиливается роль первого слагаемого $G_s \Phi_t^s$.

Ранее рассматривались различные тактики формирования Δ_{s+1} : алгоритм случайного поиска, алгоритм с обратной связью, поисковые алгоритмы. Для целей дальнейшего изложения выпишем только один алгоритм:

$$\Delta_j[s+1] = \frac{\sum_{i=1}^{s-1} \Delta_j[i] \prod_{v=1}^n \Phi(\alpha_s^{-1}(\omega_v^* - \omega_v[i]))}{\sum_{i=1}^{s-1} \prod_{v=1}^n \Phi(\alpha_s^{-1}(\omega_v^* - \omega_v[i]))}, \quad j = \{1, k\}, \quad (17)$$

где α_s – коэффициент размытости, удовлетворяющий тем же условиям, что и C_s . Непараметрические алгоритмы идентификации могут быть использованы для обучения в условиях, когда характеристики исследуемых процессов, объектов изменяются во времени заранее не известным образом. В этом случае столбцы матрицы Φ_t^s в (14) имеют вид

$$p[i] = \frac{\beta[s-j] \prod_{v=1}^n \Phi(C_s^{-1}(\omega_v - \omega_v[j]))}{\sum_{i=1}^s \beta[s-j] \prod_{v=1}^n \Phi(C_s^{-1}(\omega_v - \omega_v[j]))}, \quad (18)$$

где $\beta[s-t]$ – некоторая функция памяти, убывающая с ростом $[s-t]$.

¹ Попытки построить теорию управления организационными процессами предпринимались еще М. А. Ампером. Он выделил специальную науку об управлении государством и назвал ее кибернетикой. Несколько позже польский философ-гегельянец Б. Трентовский читал во Фрейбургском университете курс лекций «Отношение философии к кибернетике как искусству управления народом», которые опубликовал в 1843 г. Он ставил целью построения научных основ практической деятельности руководителя (кибернета) и отмечая комплексность и сложность этой проблемы: «При одной и той же политической идеологии кибернет должен управлять различно в Австрии, России или Пруссии. Точно так же в одной и той же стране он должен управлять завтра иначе, чем сегодня». Б. Трентовский справедливо видел основную трудность управления коллективом, народом (организационной системой) в сложности поведения людей: «Люди не математические символы и не логические категории, и процесс управления – это не шахматная партия. Недостаточное знание целей и стремлений людей может опрокинуть любое логическое построение. Людьями очень трудно командовать и предписывать им наперед заданные действия. Приказ, если кибернет вынужден его отдавать, всегда должен четко формулироваться. Исполняющему всегда должен быть понятен смысл приказа, его цели, результат, который будет достигнут, и кара, которая может последовать за его невыполнением, – последнее обязательно».

Изложенные выше алгоритмы идентификации базируются на стохастических аппроксимациях непараметрического типа, которые в свою очередь относятся к классу локальных. Механизм их функционирования состоит в локализации области в пространстве входных-выходных переменных, которая определяется значениями соответствующих известных переменных (и (или) функциями от них) и усреднением искомой переменной в этой области. Такое свойство позволяет естественным образом конструировать непараметрические модели при наличии разнотипных переменных.

Пусть вещественные переменные, характеризующие состояние исследуемого процесса, оказываются разнотипными. Следствием этого является наличие в векторе «входных-выходных» переменных процесса компонентов, представляющих собой как дискретно-непрерывные переменные, так и дискретные переменные, а также переменные типа булевых и псевдобулевых. Существенным здесь является факт введения меры близости между соответствующими переменными. Если это возможно, то такие переменные являются аргументами колоколообразных функций, т. е. в алгоритмах (13)...(17) фигурируют покомпонентные произведения $\Phi\left(\frac{\eta_j - \eta_j[i]}{C_s}\right)$, $j = \overline{1, \lambda}$, λ – число компонент вектора. В частности,

$$\rho_i[j] = \frac{\prod_{v=1}^n \Phi(C_s^{-1}(\omega_v[t] - \omega_v[j])) \overline{\Phi}(\eta_i - \eta_i[j])}{\sum_{i=1}^s \prod_{v=1}^n \Phi(C_s^{-1}(\omega_v[t] - \omega_v[j])) \overline{\Phi}(\eta_i - \eta_i[j])}. \quad (19)$$

В случае если меру близости ввести нельзя (например, для булевых переменных), когда близость значений переменных предполагает их совпадение, то вместо обычных колоколообразных функций $\Phi(\cdot)$ возможно использовать кусочно-постоянные функции $\overline{\Phi}(\cdot)$, такие, что для каждой j -й компоненты η

$$\overline{\Phi}(\eta_j - \eta_j[i]) = \begin{cases} 1, & \text{если } |\eta_j - \eta_j[i]| = 0, \\ 0, & \text{если } |\eta_j - \eta_j[i]| \neq 0. \end{cases} \quad (20)$$

Таким образом, алгоритмы класса (13)...(17) могут быть использованы и при наличии разнотипных переменных.

Формирование обучающей выборки с привлечением экспертов. Информационные технологии управления предоставляют широкие возможности для существенно повышения эффективности управленческой деятельности. Проведение, в частности, финансового анализа промышленного предприятия следует отнести к процессам организационного типа, которые являются прерогативой высшего звена управленческих структур предприятия, способных влиять на формирование и распределение финансовых ресурсов и на потоки денежных средств.

Конечно же, в такой системе крайне желательно использовать уже накопленный опыт по совершенствованию управления производством. Но если информацию такого рода извлекать на самом предприятии, то ее будет явно не достаточно. Здесь целесообразно использовать опыт и знания прогрессивных управленцев (менеджеров). Процесс получения данной информации можно представить себе как ответы различных экспертов-управленцев на различные вопросы, отражающие многообразие производственных и управленческих ситуаций.

Пусть некоторая производственно-финансовая функция, обозначим ее z , может быть охарактеризована количественно. Она зависит от n производственных, финансовых и экономических показателей $x = (x_1, \dots, x_n)$. Ясно, что характер такой зависимости заранее не известен. Но в результате опроса группы экспертов может быть сформирована обучающая выборка $z_p, x_p, i = \overline{1, S}$. В этом случае может быть поставлен вопрос о построении модели исследуемого процесса, т. е. об установлении стохастической зависимости z от вектора $x = (x_1, \dots, x_n)$. Совершенно ясно, что реакция каждого эксперта, определение им соответствующего значения z на предоставленный ему набор параметров-признаков x_{j1}, \dots, x_{jn} будет различной. Это различие обусловлено профессиональным уровнем самого эксперта, его опытом, знаниями, склонностями в оценивании ситуаций. Объективность подобной модели основывается на усреднении мнений этих экспертов.

Осуществление подобного опроса с целью формирования обучающей выборки требует тщательной подготовки. Она будет состоять в том, чтобы заранее сформулировать (описать и представить в численном виде) те или иные производственно-финансовые ситуации. Сама же процедура работы с группой экспертов будет состоять в предоставлении им описания i -й ситуации с последующей фиксацией оценки каждым экспертом значения $z_p, i = \overline{1, S}$. Такая технология получения заключения эксперта может осуществляться по разным схемам («мозговой штурм», метод блокнота и др.). Следует обратить внимание, что вся процедура формирования обучающей выборки является очень важной и требует точной и внимательной обработки.

Если представить их модель в виде $z = f(x, \omega, \xi)$, где ω символизирует склонности, характер экспертов, а ξ – фактор случайности в оценке тех или иных ситуаций, то сама модель этого процесса будет выглядеть следующим образом: $z = \hat{f}(x)$. При таких условиях можно сформулировать задачу идентификации на основе имеющейся обучающей выборки $z_p, x_p, i = \overline{1, S}$. Эти модели могут строиться в классе регрессионных или в классе вероятностных. Последнее означает, что оценка z дается как наиболее вероятное значение отклика исследуемой системы на воздействие x . Если подобные модели построены, то большой интерес представляет эксперимент, состоящий в отклике (прогнозе) ситуации z , которая порождается значениями вектора x , и сравнении этого прогноза с оценками экспертов, или фактическим состоянием ситуации, если последнее реально осуществимо.

Такой эксперимент можно провести по имеющейся обучающей выборке в скользящем режиме, но может быть также осуществлен и на вновь сформированной обучающей выборке, где компоненты вектора x , задаваемые экспертами, могут не очень отличаться от тех, которые определены в исходной обучающей выборке. Конечно, в этом случае необходимо провести детальный ретроспективный анализ, особенно в тех ситуациях, когда компьютерный прогноз окажется существенно отличным от прогноза экспертов.

Как уже отмечалось выше, проведение подобного процесса накопления информации представляется неизбежным из-за того, что даже если производством или

другой системой, объектом, учреждением и управляли (принимали управленческие решения), но количественно или каким-либо другим способом все эти акты принятия решений не фиксировали, то возможность какого-либо объективного ретроспективного анализа в этом случае будет исключена. Предлагаемый путь создания соответствующих компьютерных систем принятия управленческих решений позволяет, опираясь на информацию, полученную за небольшой промежуток времени от экспертов, создать обучающуюся систему принятия решений, которая в последующем на основе уже реальных событий будет способна доучиваться. В этом смысле вполне возможно ожидать от нее повышения качества в процессе обучения принятию решений по формированию управленческих действий.

Таким образом может быть сформирована соответствующая обучающая выборка, которая и будет использоваться для построения диалоговой системы принятия решений «компьютер–ЛПР». В случае если некоторые фрагменты производственной и финансово-хозяйственной деятельности поддаются математической формализации, для конструирования блоков системы принятия решений стоит использовать существующие формальные процедуры, основанные на моделировании и оптимизации в обстановке случайных факторов, недостатка априорных сведений и различного рода неопределенностей.

Процесс выработки решений для управления описанной выше организационной системой является достаточно сложным, поскольку здесь фигурируют переменные различной природы: вещественные, дискретные, булевы. В принципе, можно также говорить и о переменных лингвистического характера. Здесь существенным, а может быть, и определяющим является тот факт, что сбор и накопление необходимой информации для создания компьютерной системы поддержки принятия решений крайне затруднены. Опыт показывает, что попытка создания соответствующих обучающих выборок или реализации по фактически имеющейся информации часто обречены на неудачу. Обусловлено это тем, что ряд значений тех или иных факторов, относящихся к категории $\theta(t)$, $\lambda(t)$, часто оказываются утраченными. Не имея достаточно полноценной, объективной обучающей выборки, невозможно построить достаточно эффективную компьютерную систему поддержки принятия решений. Это обусловлено не только плохой памятью и эмоциями человека, но и, в частности, тем, что круг людей, принимавших решения раньше, мог за это время измениться.

Можно представить ситуацию, что мы с текущего момента начинаем создавать обучающую выборку. Понятно, что на этой стадии необходима тщательно разработанная с позиций системного анализа информационная структура, включающая все возможные факторы, которые влияют на выработку и принятие соответствующих организационных решений. Следует иметь в виду, что организационные решения могут иметь как производственную, так и финансово-экономическую сущность. Следовательно, для выработки соответствующих решений будут необходимы различные, соответствующие последним наборы факторов.

Допустим, что подобная работа проведена, тогда необходимо осуществить формирование соответствующих обучающих выборок, где опять будут фигурировать разнотипные переменные. Но как осуществить накопление значений этих переменных? Важнейшим здесь является время формирования подобных обучающих выборок. Совершенно очевидно, что подобная работа по формированию обучающих выборок затянется на многие годы. И это обстоятельство при создании компьютерной системы поддержки принятия решений может иметь решающее значение.

Известно, что сегодня эти решения принимаются управленцами различных уровней на основании создавшейся текущей ситуации и опыта этих управленцев. Опыт и знания управленца в данном случае являются синонимами тех обучающих выборок, которые необходимы для функционирования компьютерной системы поддержки принятия соответствующих решений. Каков же выход из создавшегося положения?

По-видимому, единственным реальным путем создания обучающих выборок является использование опыта управленцев различных рангов. И в этом случае наиболее эффективным видится создание группы экспертов, которыми и будут являться группы управленцев по тем или иным направлениям (производственным, финансовым, производственно-экономическим и т. д.). Причем совершенно очевидно, что это будут различные группы, соответствующие разным иерархическим уровням организационно-управленческой системы. Содержанием деятельности этих групп является воссоздание каждым экспертом тех ситуаций, которые уже имели место ранее, и тех решений, которые были в то время приняты.

Одной из трудностей, с которыми мы столкнемся на этом пути, будут разные мнения различных экспертов по поводу выработки одних и тех же решений. Проблема согласования этих мнений сама по себе является достаточно трудной задачей.

Допустим, что все перечисленные выше трудности удалось преодолеть. В итоге будет сформирована обучающая выборка, состоящая из векторных переменных $u(t)$, $\mu(t)$, $\omega(t)$, $\theta(t)$, $\lambda(t)$. Нет сомнений, что размерность подобной задачи принятия решений будет достаточно велика. С другой стороны, объем обучающей выборки наверняка окажется достаточно малым по отношению к общей размерности задачи. Тем не менее следует отметить, что человек-управленец при выработке тех или иных решений находится именно в такой ситуации. Более того, известно немало примеров, когда в подобных условиях принимаются достаточно разумные, эффективные решения, как производственные, так и финансово-экономические. С математической точки зрения это может быть обусловлено следующей особенностью. Положим, что нам необходимо построить обучающиеся модели по соответствующим обучающим выборкам. Еще раз отметим, что значение выходной переменной (отклика принятия решения) зависит от достаточно большого числа входных переменных. Анализ показывает, что подобная модель, без которой невозможна выработка эффективных решений, вообще говоря, не может быть очень качественной. Но, как отмечалось выше, в организационных систе-

мах управления предприятиями все-таки имеют место достаточно эффективные решения, о чем можно судить по соответствующим откликам на эти решения. Если проводить математическую аналогию, то подобную ситуацию можно сравнить с необходимостью восстановления некоторой зависимости, когда число аргументов (входных переменных) достаточно велико. Например, можно говорить о восстановлении функций 10 аргументов, когда объем исходной выборки составляет 300 наблюденных значений. Совершенно очевидно, что объем выборки чрезвычайно мал, но задача аппроксимации функции тем не менее является решенной достаточно удовлетворительно.

С математической точки зрения это может иметь, пожалуй, единственное объяснение. Оно состоит в том, что исследуемый процесс имеет трубчатую структуру. Иными словами, речь идет не о восстановлении поверхности, а о восстановлении некоторой трубки (ее можно представить как вырожденный случай восстановления линии в многомерном пространстве).

Если при выработке управленческих решений мы предполагаем достаточно качественной моделью, то и выработанные управленческие решения будут достаточно эффективными. В этой связи можно сделать заключение о том, что модели многих организационных процессов (да и не только организационных) имеют трубчатую

структуру. Моделирование и управление подобными процессами было осуществляется методами статистического моделирования.

Библиографический список

1. Цыпкин, Я. З. Основы информационной теории идентификации / Я. З. Цыпкин. М.: Наука, 1984. 320 с.
2. Медведев, А. В. Непараметрические системы адаптации / А. В. Медведев. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1983. 174 с.
3. Катковник, В. Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных / В. Я. Катковник. М.: Наука, 1985. 336 с.
4. Хардле, В. Прикладная непараметрическая регрессия / В. Хардле. М.: Мир, 1993. 349 с.
5. Медведев, А. В. О моделировании организационных процессов / А. В. Медведев // Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева: сб. науч. тр. / САА. Вып. 1. Красноярск, 2000. С. 173–191.
6. Льюнг, Л. Идентификация систем / Л. Льюнг. М.: Наука, 1991. 423 с.
7. Красноштанов, А. П. Комбинированные многосвязные системы / А. П. Красноштанов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2001. 175 с.

Е. В. Burulev, Е. А. Zajtseva, А. V. Medvedev

NON-PARAMETRIC MODELS AND DECISION MAKING ALGORITHMS

The problem of discrete-continuous process modeling in case of chance factors and various indeterminations influence is considered. In case of need organization processes modeling the system involved decomposition is required depend upon math formalization ability. The problem of modeling in the narrow and the wide sense and also some organization processes identification features are discussed.

Е. Н. Васильев, Е. С. Никифорова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГИПЕРТЕПЛОПРОВОДНОГО РАДИАТОРА МОЩНОГО РАДИОЭЛЕМЕНТА

Проведено обсуждение проблем охлаждения мощных радиоэлектронных элементов. Для повышения интенсивности теплообмена предложено использовать явление гипертеплопроводности. Компьютерное моделирование процесса теплообмена при различных условиях показало высокую эффективность гипертеплопроводных радиаторов.

Обеспечение оптимального теплового режима является одной из самых серьезных проблем при работе мощных полупроводниковых радиоэлементов. Наиболее остро стоит эта проблема для современных микропроцессоров. Мощность их тепловыделения уже приближается к 100 Вт, а температура отдельных участков достигает 120 °С. При этом основная трудность заключается в отводе теплоты от достаточно мощного источника, имеющего малые размеры. В настоящее время складывается ситуация, когда развитие существующих средств охлаждения микропроцессоров не успевает за увеличением выделяемой ими тепловой мощности. Традиционные системы теплоотвода уже едва справляются с охлаждением новых процессоров. Каких-то кардинальных решений по уменьшению выделения теплоты на уровне чипа пока не предвидится, поэтому совершенно необходимо повышение эффективности средств охлаждения процессора.

Обычно для охлаждения процессора на него устанавливается радиатор, а на радиатор – вентилятор (рис. 1). Радиатор характеризуется рядом параметров, от которых зависит качество охлаждения. Основными параметрами, определяющими эффективность охлаждения, являются величина эффективной площади теплопередающей поверхности и значение коэффициента теплопроводности материала, из которого выполнен радиатор.

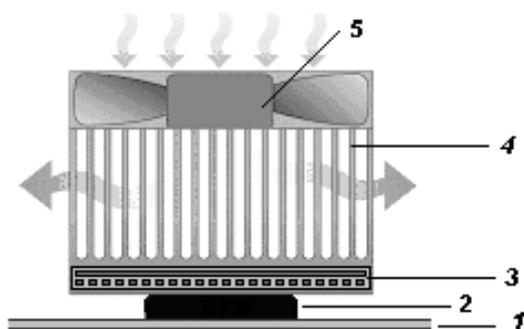


Рис. 1. Система охлаждения микропроцессора

Поверхность теплообменника может быть расширена как путем увеличения поперечных размеров основания, так и за счет развитого оребрения. Наличие ребер позволяет существенно увеличить поверхность теплообмена. Поскольку тепловой поток направлен от радиоэлемента на основание радиатора, а затем распространяется по высоте ребра, то перепад температур между охлаждающей средой и поверхностью радиатора уменьшается по мере удаления от источника тепловыделения. Увели-

чение удельной поверхности при расширении габаритов радиатора и уменьшении толщины ребра с некоторого момента не имеет смысла, потому что, начиная с некоторого расстояния, перепад температуры «среда – поверхность радиатора» становится малым и эта часть радиатора как бы «выключается» из теплообмена. Дальнейшее увеличение удельной поверхности возможно при повышении теплопроводности материала теплообменника, но в природе нет других материалов, имеющих лучшие теплопроводящие свойства, чем традиционно применяемые алюминий и медь. Но здесь следует учесть, что предельные характеристики этих материалов уже достигнуты.

Одним из путей увеличения эффективной теплопроводности материала является использование переноса скрытой теплоты испарения, применяемого в работе тепловых труб [1]. Обычные тепловые трубы обладают свойством гипертеплопроводности, т. е. сверхвысокими теплопередающими способностями. При комнатной температуре и использовании в качестве теплоносителя аммиака, поперечном размере трубы 1 см и длине 1 м теплопроводность такой тепловой трубы может превышать теплопроводность медного стержня таких же размеров до 1 000 раз. Иными словами, при одинаковых перепадах температуры на концах тепловая труба передает в 1 000 раз больше тепловой поток, чем медный стержень, и термин *гипертеплопроводность* применен здесь в этом смысле.

Обычные тепловые трубы переносят теплоту линейно, только в одном направлении. Более эффективным для охлаждения является теплоперенос по площади, который можно осуществлять с помощью массивов микротепловых труб. Одним из решений проблемы интенсификации теплообмена является внедрение в основание радиатора плоской подложки, состоящей из массивов микротепловых труб. Эти трубы могут быть расположены в два слоя, которые ориентированы в перпендикулярных направлениях, или образовывать решетку. Целью данной работы является расчет эффективной теплопроводности массива микротепловых труб и определение характеристик теплообмена радиатора, включающего гипертеплопроводящую подложку.

Расчет эффективной теплопроводности массива микротепловых труб. В основе работы тепловых труб лежит перенос скрытой теплоты парообразования теплоносителя. Рабочее вещество у горячего конца трубы переходит из жидкого состояния в парообразное, забирая большое количество теплоты на изменение внутренней энергии. Вследствие испарения рабочее тело расширяется и перемещается к холодного конца канала, где кон-

денсруется, отдавая теплоту во внешнюю среду. Возвращение рабочего тела к горячему концу в этом случае происходит за счет работы капиллярных сил (сил поверхностного натяжения жидкости).

Расчет эффективной теплопроводности массива труб $\lambda_{эфф}$ проведем для характерной толщины подложки вместе со слоем каналов ~ 1 мм и умеренных тепловых потоках (когда течение в паровом канале ламинарное и $v_{пара} \ll v_{звук}$). При этом саму подложку будем рассматривать как узкий прямоугольный канал (рис. 2), на одну из сторон которого подается тепловой поток, передаваемый затем вдоль стороны l . Введем физические величины, которые будут использованы для расчета теплопроводности: a, W, l – толщина, ширина и длина канала; Q – количество теплоты, подаваемой на торцевую сторону канала, имеющую площадь $S = aW$; $H_{исп}$ – скрытая теплота испарения; $\lambda_{ж}$ – теплопроводность жидкой фазы теплоносителя; $\rho_{п}$ – плотность пара, $\eta_{п}$ – динамическая вязкость пара, $(\partial T / \partial P)_s$ – производная по кривой насыщения теплоносителя; δ – толщина пленки жидкого теплоносителя на торцевой стенке.

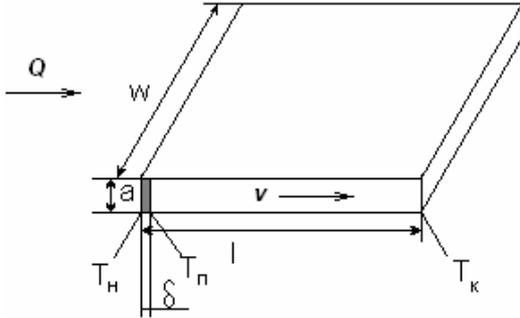


Рис. 2. Схема обозначений, применяемая при описании процессов теплопередачи в гипертеплопроводной подложке

В соответствие с законом теплопередачи запишем следующее соотношение:

$$Q = \frac{\lambda_{эфф} S \Delta T}{l}, \quad (1)$$

по которому выразим обратную величину эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эфф}$:

$$\frac{1}{\lambda_{эфф}} = \frac{S \Delta T}{Q l}. \quad (2)$$

Общий перепад температуры является суммой перепадов температур на пленке жидкой фазы $\Delta T_{ж}$ и по паровому тракту $\Delta T_{п}$:

$$\Delta T = \Delta T_{ж} + \Delta T_{п} = T_{н} - T_{к}. \quad (3)$$

Величина $\Delta T_{ж}$ определяется по соотношению, аналогичному (1), через коэффициент теплопроводности жидкости и параметры канала:

$$\Delta T_{ж} = \frac{Q \delta}{\lambda_{ж} S}. \quad (4)$$

Влияние теплопроводности пара на процесс теплопередачи является пренебрежимо малым, поэтому зависимость температуры в паровом участке канала определяется распределением давления и наклоном кривой насыщения, в связи с чем температурный перепад имеет следующую зависимость от разности давлений на длине канала:

$$\Delta T_{п} = \Delta p_{п} \left(\frac{\Delta T_{п}}{\Delta p_{п}} \right) \approx \Delta p_{п} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right). \quad (5)$$

Перепад давления обусловлен силой трения, величина которой зависит от вязкости парообразного теплоносителя и геометрических параметров канала:

$$\Delta p_{п} = \frac{F_{мп}}{S} = \frac{\eta_{п} S_{мп} \langle v \rangle}{S \langle d_{мп} \rangle}, \quad (6)$$

где $S_{мп} = 2lw$ – поверхность трения; $\langle v \rangle / \langle d_{мп} \rangle$ – градиент скорости пара в поперечном направлении. Для плоского канала с ламинарным течением

$$\frac{\langle v \rangle}{\langle d_{мп} \rangle} = \frac{6 \langle v \rangle}{a}. \quad (7)$$

Величина средней скорости определяется массовым и объемным расходом пара с помощью соотношений

$$\frac{dm}{dt} = \frac{Q}{H_{исп}}, \quad (8)$$

$$\frac{dV_{п}}{dt} = \frac{dm}{dt} \frac{1}{\rho_{п}} = \frac{Q}{H_{исп} \rho_{п}}. \quad (9)$$

С учетом (8) и (9) имеем:

$$\langle v \rangle = \frac{dV_{п}}{dt} \frac{1}{S} = \frac{Q}{H_{исп} \rho_{п} S}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (7) и (6), получим перепад температур на паровом участке канала:

$$\Delta T_{п} = \frac{6 \eta_{п} Q (\partial T / \partial P)_s S_{мп}}{H_{исп} \rho_{п} S^2 a}. \quad (11)$$

Учитывая выражения (11) и (5), в (3) и (2) определим обратное значение эффективной теплопроводности:

$$\frac{1}{\lambda_{эфф}} = \frac{S}{Q l} (\Delta T_{ж} + \Delta T_{п}) = \frac{S}{Q l} \frac{Q \delta}{\lambda_{ж} S} + \frac{S}{Q l} \frac{6 \eta_{п} Q (\partial T / \partial P)_s S_{мп}}{H_{исп} \rho_{п} S^2 a}, \quad (12)$$

и окончательно получим

$$\lambda_{эфф} = \left(\frac{\delta}{\lambda_{ж} l} + \frac{12 \eta_{п} (\partial T / \partial P)_s}{H_{исп} \rho_{п} a^2} \right)^{-1}. \quad (13)$$

По соотношению (13) значение $\lambda_{эфф}$ зависит не от величины теплового потока, а в основном от свойств теплоносителя и геометрии канала.

Для канала толщиной 1 мм и длиной 100 мм расчеты показывают, что величина эффективной теплопроводности на паровом участке составляет $\lambda \sim (10^4 \dots 10^5) \lambda_{Cu}$. С учетом толщины пленок жидкости на участках конденсации и испарения (несколько десятков микрометров) и торцевых стенок конструкции подложки получено значение $\lambda \approx 10^3 \lambda_{Cu}$.

Математическая модель теплообмена радиатора с внешней средой. Исследование тепловых режимов радиатора радиоэлемента было проведено с помощью компьютерного моделирования. Математическая модель процесса теплообмена основана на численном решении нестационарного двумерного уравнения теплопроводности, которое описывает процесс распространения теплоты в пластине. Для определения температурных полей решалось уравнение вида

$$c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + q_v(x, y, t) - \alpha_v(x, y, t) T, \quad (14)$$

где c_v – удельная объемная теплоемкость материала; ρ – плотность; T – температура; λ – теплопроводность; t – время; x, y – координаты; q_v – объемная плотность тепло-

вого потока от источников тепла; α_v – объемный коэффициент теплообмена обеих поверхностей пластины с окружающей средой. При этом используются граничные условиями третьего рода:

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial l} + \alpha T \right]_{l=0,L} = q|_{l=0,L}, \quad (15)$$

где $l = x, y$. Начальное условие имеет вид $T|_{t=0} = T_0(x, y) = \text{const}$.

Для численного решения задачи (14), (15) применен метод расщепления по пространственным координатам [2; 3], при этом решение исходного двумерного уравнения заменяется на решение набора локально-одномерных задач. Для численного решения задачи вводится сеточная функция $T_{n,m}^j$, соответствующая значениям температуры в узлах разностной координатной сетки при

$$x_n = (n-1)h_x, \quad y_m = (m-1)h_y, \quad t_j = (j-1)\tau,$$

и промежуточная функция $U_{n,m}^j$.

На первом этапе решаются локально-одномерные задачи в направлении x для всех y_m и определяются значения промежуточной функции:

– для $n = 1$

$$U_{2,m}^j - \left(1 + \frac{\alpha_{0,x} h_x}{\lambda_{3/2,m}} + \frac{(c_v \rho)_{1,m} h_x^2}{2\lambda_{3/2,m} \tau} + \frac{\alpha_{V1,m} h_x^2}{4\lambda_{3/2,m}} \right) U_{1,m}^j + \frac{q_{0,x} h_x}{\lambda_{3/2,m}} + \frac{h_x^2}{2\lambda_{3/2,m}} \left(\frac{q_{V1,m}}{2} + \frac{(c_v \rho)_{1,m}}{\tau} T_{1,m}^{j-1} \right) = 0; \quad (16)$$

– для $n = 2, \dots, N-1$

$$U_{n+1,m}^j - \left(1 + \frac{\lambda_{n-1/2,m}}{\lambda_{n+1/2,m}} + \frac{(c_v \rho)_{n,m} h_x^2}{\lambda_{n+1/2,m} \tau} + \frac{\alpha_{Vn,m} h_x^2}{2\lambda_{n+1/2,m}} \right) U_{n,m}^j + \frac{\lambda_{n-1/2,m}}{\lambda_{n+1/2,m}} U_{n-1,m}^j + \frac{h_x^2}{\lambda_{n+1/2,m}} \left(\frac{q_{Vn,m}}{2} + \frac{(c_v \rho)_{n,m}}{\tau} T_{n,m}^{j-1} \right) = 0; \quad (17)$$

– для $n = N$

$$- \left(1 + \frac{\alpha_{0,x} h_x}{\lambda_{N-1/2,m}} + \frac{(c_v \rho)_{N,m} h_x^2}{2\lambda_{N-1/2,m} \tau} + \frac{\alpha_{VN,m} h_x^2}{4\lambda_{N-1/2,m}} \right) U_{N,m}^j + U_{N-1,m}^j + \frac{q_{L,x} h_x}{\lambda_{N-1/2,m}} + \frac{h_x^2}{2\lambda_{N-1/2,m}} \left(\frac{q_{VN,m}}{2} + \frac{(c_v \rho)_{N,m}}{\tau} T_{N,m}^{j-1} \right) = 0. \quad (18)$$

На втором этапе по соотношениям, аналогичным (16)...(18), решаются локально-одномерные задачи в направлении y для всех x_n и вычисляются значения температуры на следующем временном слое. Алгебраические уравнения на сеточные функции $U_{n,m}^j$ и $T_{n,m}^j$ решаются с помощью метода прогонки.

Пространственная форма радиатора является достаточно сложной для описания, поэтому для упрощения вычислений моделирование теплопередачи было проведено раздельно для основания радиатора и ребер. При этом по рассчитанным характеристикам теплообмена ребра определялся коэффициент, отвечающий за увеличение теплоотдачи, обусловленное оребрением. Значение этого коэффициента учитывалось затем в эффективном коэффициенте теплообмена с внешней средой $\alpha_{эфф}$ для основания радиатора.

Теплообмен в прямоугольном ребре охлаждения. При моделировании рассматривались прямоугольная форма алюминиевого ребра охлаждения с высотой $h = 0,05$ м и толщиной $d = 1$ мм. В задаче задавались также температура внешней среды $T_o = 20$ °С, температура основания ра-

диатора T_1 , на котором расположены ребра, коэффициент теплообмена с внешней средой α и коэффициент теплопроводности материала ребра $\lambda = 209$ Вт/(м·К). Для определения эффективности теплообмена рассеиваемая тепловая мощность сравнивается с максимальной мощностью, которая соответствует температуре всей поверхности ребра, равной температуре основания.

Величина коэффициента теплообмена α зависит от скорости обдува ребра воздухом. По справочным данным [4], для пластинчатых теплообменников при скорости 8 м/с $\alpha = 10$ Вт/(м²·К), при скорости 20 м/с $\alpha = 50$ Вт/(м²·К). В нашем случае расчеты проведены для широкого диапазона значений $\alpha = 10, 30$ и 100 Вт/(м²·К). При этом следует отметить, что в компьютерах возможность увеличения скорости обдува ограничена требованием по допустимому уровню шума, возникающему при работе вентилятора.

Распределение температуры по высоте ребра показывает, что на удаленном конце ребра температура заметно снижается, особенно при высоких значениях коэффициента теплообмена (рис. 3). Эффективность теплоотдачи для $\alpha = 10, 30$ и 100 Вт/(м²·К) составляет 92,4, 80,7 и 57,6 % соответственно.

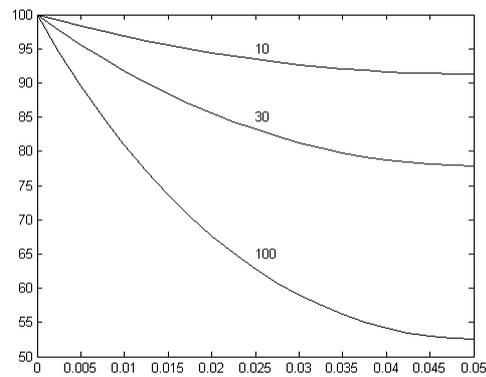


Рис. 3. Распределение температуры по высоте ребра при $\alpha = 10, 30$ и 100 Вт/(м²·К)

Рассчитаем значение коэффициента, описывающего увеличение теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью. Для случая когда ребра на основании радиатора расположены с шагом $2d$, эффективное увеличение площади теплообмена составляет $103/3 \approx 34$. С учетом эффективности теплоотдачи увеличение снимаемой мощности составляет $k = 28, 25$ и 18 раз для $\alpha = 10, 30$ и 100 Вт/(м²·К). Следовательно, оребрение дает возможность существенно повысить значение снимаемой тепловой мощности по сравнению с гладкой поверхностью.

Распределение температуры в основании радиатора.

Рассмотрим теплообмен в плоской алюминиевой пластине, на которой расположен тепловыделяющий элемент заданной мощности Q (рис. 4). Теплота распространяется по материалу пластины за счет теплопроводности, а также отводится во внешнюю среду, имеющую температуру T_o , в соответствии с законом $q = \alpha(T - T_o)$. Площадь пластины принята равной 80×80 мм², в центре пластины расположен тепловыделяющий элемент мощностью 100 Вт, имеющий площадь посадочного места 20×20 мм². Значение эффективного коэффициента теплообмена определяется как $\alpha_{эфф} = k\alpha$, где α – коэффициент теплообмена для гладкой поверхности.

Результаты моделирования для $\alpha_{\text{эфф}} = 280 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ (рис. 5) показали, что максимальное значение температуры в центре пластины достигает значения $T_{\text{max}} = 117^\circ\text{C}$, минимальное значение на краях 60°C , перепад температуры составляет $\Delta T = 57^\circ\text{C}$. При этом следует учитывать, что температура самого радиоэлемента будет выше значения T_{max} , поскольку стык в месте его крепления к радиатору имеет некоторое термическое сопротивление. Значения плотности снимаемого теплового потока в центре пластины и на краях соответственно равны $2,7 \cdot 10^3$ и $0,75 \cdot 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2$, т. е. на краях эффективность охлаждения почти в 4 раза ниже по сравнению с центром, следовательно вклад периферийных областей достаточно низкий. Такая большая разница в характеристиках теплообмена по площади основания вызвана тем, что механизм теплопроводности традиционных материалов не обеспечивает эффективную теплопередачу к краям пластины, которые остаются относительно холодными.

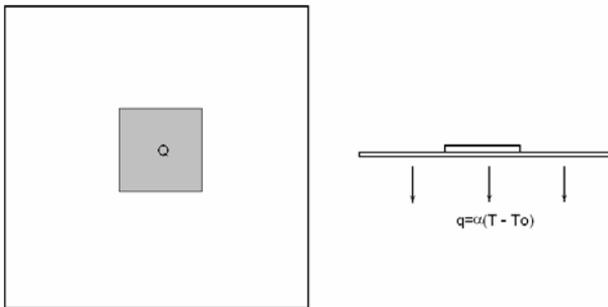


Рис. 4. Схема теплообмена в основании радиатора

Чтобы определить необходимый уровень значений коэффициента теплопроводности для улучшения эффективности охлаждения, было проведено моделирование теплообмена при более высокой теплопроводности основания радиатора $\lambda = 10\lambda_{\text{Al}}$ и $100\lambda_{\text{Al}}$. При $\lambda = 10\lambda_{\text{Al}}$ значение температуры в центре $T_{\text{max}} = 70^\circ\text{C}$ при перепаде температур $\Delta T = 8^\circ\text{C}$, а при $\lambda = 100\lambda_{\text{Al}}$ значения $T_{\text{max}} = 62^\circ\text{C}$ и $\Delta T = 09^\circ\text{C}$. Таким образом, десятикратное и тем более стократное повышение λ приводит к снижению как перепада температуры, так и температуры в центре пластины, что означает снижение температуры самого радиоэлемента. Проведенные расчеты показывают, что применение гипертеплопроводных подложек позволит существенно повысить однородность температурного поля радиатора и эффективность теплообмена. В этом случае

малая величина перепада температуры дает возможность значительного увеличения площади радиатора.

Следует также отметить, что данные расчеты приведены для радиатора, в котором гипертеплопроводная подложка встроена только в основание. Однако применение таких подложек также возможно в ребрах, что даст дополнительные возможности для увеличения эффективности охлаждения мощных радиоэлементов.

Таким образом, математическое моделирование процесса теплообмена показало, что при параметрах, характерных для современных микропроцессоров, распределение температуры в основании радиатора становится практически однородным при значении коэффициента теплопроводности $\lambda \sim 100\lambda_{\text{Al}}$, которое вполне может быть достигнуто при применении массивов микротепловых труб. Применение в системах охлаждения технологии гипертеплопроводников позволит значительно увеличить эффективность теплообмена и снизить температуру мощных и миниатюрных полупроводниковых устройств.

Библиографический список

1. Чи, С. Тепловые трубы: Теория и практика / С. Чи. М.: Машиностроение, 1981.
2. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. М.: Наука, 1989.
3. Дульнев, Г. Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. М.: Высш. шк., 1990.
4. Кутателадзе, С. С. Справочник по теплопередаче / С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. Л.: Госэнергоиздат, 1959.

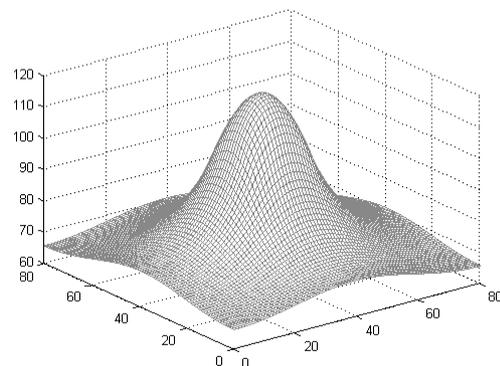


Рис. 5. Распределение температуры в основании радиатора

E. N. Vasilyev, E. S. Nikiforova

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT REGIME OF HYPER THERMAL CONDUCTIVE RADIATOR FOR POWER ELECTRONIC ELEMENT

Problems of the cooling technology for power electronics elements are discussed. To increase heat transfer intensity, the use of hyper thermal conductivity phenomena is suggested. Computing modeling of the heat transfer for various conditions showed high efficiency of hyper thermal conductive radiators.

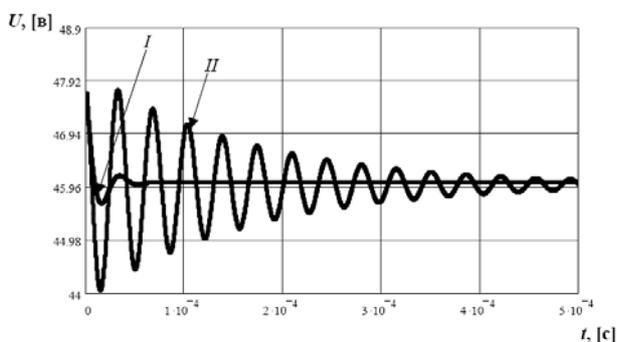
Н. Н. Горяшин, А. Б. Базилевский

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОЦЕНОК ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрена возможность анализа стабилизатора напряжения на базе понижающего квазирезонансного преобразователя с коммутацией ключевого элемента при нулевых значениях тока как существенно нелинейной системы автоматического регулирования. В работе использован метод оценок влияния нелинейностей на переходные процессы в нелинейных системах.

Математический аппарат анализа нелинейных систем связан с необходимостью исследования нелинейных дифференциальных уравнений (ДУ), теория которых содержит множество индивидуальных методов, присущих различным видам уравнений, описывающих систему. Сложность решения нелинейных ДУ вызывает необходимость создания ряда приближенных методов, позволяющих судить о характере процессов, наблюдаемых в системе. При этом нелинейные характеристики реальных элементов системы заменяют приближенными линейными функциями.

Такой подход нецелесообразен при анализе систем, в которых присутствуют существенные нелинейности и не всегда возможно получить решение в аналитическом виде. К таким системам можно отнести стабилизатор напряжения (СН), построенный на базе квазирезонансного преобразователя [1], математическая модель которого представлена в виде системы нелинейных ДУ второго порядка. Основной особенностью рассматриваемого устройства является то, что при замене параметрических нелинейных элементов (НЭ), обусловленных физической сущностью работы ключевого элемента (КЭ) в цепи резонансного контура (РК), на линейный коэффициент значительно снижается точность получаемого решения, что не позволяет проводить анализ системы при больших возмущающих воздействиях и синтез закона регулирования. Для подтверждения этих утверждений было промоделировано поведение напряжения на выходе исходной нелинейной модели исследуемого СН и ее линейризованного варианта при ступенчатом уменьшении сопротивления нагрузки в 2 раза (см. рисунок).



Переходные процессы на выходе СН на базе квазирезонансного преобразователя при ступенчатом изменении сопротивления нагрузки 10...5 Ом, полученные при решении системы нелинейных ДУ (I) и линейризованной системы ДУ (II)

На основании полученных при испытаниях результатов можно сделать вывод, что НЭ системы существенно влияет на ее динамические свойства: время переходного процесса, перерегулирование, колебательность. Исходя из этого можно сформулировать следующее утверждение для данной системы: если линейризованная система устойчива, то нелинейная система, соответствующая ей, будет тоже устойчива. Последнее утверждение можно прокомментировать как частный случай вывода, основанного на методе оценок влияния нелинейностей на переходные процессы [2], который в общем виде необходимо дополнить таким образом: если в нелинейной системе имеются автоколебания, то их амплитуда не превышает δ_{∞} . Значение δ_{∞} – верхнюю оценку – можно получить по выражению

$$\delta_{\infty} = z_{\Delta \max} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} [|h_0| + |h_i - h_{i-1}|],$$

где $z_{\Delta \max}$ – максимальное (по абсолютной величине) значение разности между характеристикой НЭ и линейризованной функцией; h_i – i -й экстремум переходной функции.

Описанный метод [2] позволяет оценить разницу между динамическими процессами в нелинейной и близкой к ней линейной системе, получаемой путем замены нелинейной характеристики на линейную.

Применение указанного метода для анализа данной системы позволит упростить задачу синтеза закона управления в том случае, если корректирующее устройство, рассчитанное для линейризованной системы, является линейным динамическим звеном, которое в свою очередь можно связать через верхнюю оценку δ_{∞} с законом управления исходной системы.

Такой подход к анализу нелинейных систем не накладывает ограничений на порядок системы и позволяет исследовать любые НЭ: от релейных элементов до гладких функций, при условии, что исходная система устойчива. Точность метода зависит от точности определения разностной характеристики $z_{\Delta \max}$.

Библиографический список

1. Горяшин, Н. Н. Особенности разработки резонансных преобразователей напряжения для систем электропитания космических аппаратов / Н. Н. Горяшин // САКС-2004: материалы междунар. науч.-практ. конф. / СибГАУ. Красноярск, 2004. С. 77–78.
2. Нетушил, А. В. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / А. В. Нетушил. Ч. 2. М.: Высш. шк. 1972. С. 430.

N. N. Gorjashin, A. B. Bazilevsky

**APPLICATION OF ESTIMATED INFLUENCE OF NON-LINEARITY ON TRANSIENT
PROSESSES IN NON-LINEAR SYSTEMS METHOD**

In this article the possibility of voltage stabilizer analysis on the basis of zero-current-switch quasi-resonant converter, as essentially non-linear system of automatic control, by using method of estimated influence of non-linearity on transient processes in non-linear systems is considered.

Н. Д. Демиденко, Ю. А. Терещенко, И. Н. Мельник

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Решается задача оптимального управления процессами разделения многокомпонентных смесей. Получены необходимые условия оптимальности. Разработан численный метод решения задачи оптимизации. Проведен численный эксперимент.

Основу процесса разделения многокомпонентных смесей составляют тепломассообмен и гидродинамика взаимодействующих потоков. Этот процесс характеризуется большим количеством параметров, связанных между собой сложными зависимостями. Значительная часть параметров является функциями временной и пространственных координат.

Анализ большой группы ректификационных колонн показал, что в промышленных условиях в подавляющем большинстве случаев эти колонны работают в динамическом режиме, т. е. со временем меняется состав сырья, его количество и др. Кроме того, на колонну действует система управления с помощью различных параметров управления. Поэтому для исследования процесса ректификации необходима математическая модель, которая отражает динамику процесса при возмущении по различным параметрам.

Уравнение нестационарного процесса массообмена для многокомпонентных смесей. При исследовании процесса ректификации интерес представляет распределение концентраций компонентов по длине колонны в статических и динамических режимах ее работы. Поэтому математическая модель процесса ректификации, как правило, представляет собой систему уравнений, записанных относительно концентраций компонентов. Примером такой математической модели является следующая система уравнений [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H_x x_i)}{\partial t} - \frac{\partial(Lx_i)}{\partial l} &= k_y (y_i - y_i^*) + \rho_{1f_i}, \\ \frac{\partial(H_y y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(Vy_i)}{\partial l} &= k_y (y_i^* - y_i) + \rho_{2f_i}, \quad 1 \leq i \leq N, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x_i = x_i(l, t)$, $y_i = y_i(l, t)$ – концентрации компонентов в жидкой и паровой фазах; H_x , H_y – удерживающие способности по жидкости и пару; L , V – потоки жидкости и пара; $y^* = y^*(x)$ – равновесная концентрация в жидкой фазе; k_y – коэффициент массопередачи.

Эти уравнения выражают закон сохранения количества вещества каждого компонента в жидкой и паровой фазах. Выражение $k_y (y_i - y_i^*)$ определяет непрерывный по всей длине колонны фазовый переход i -го компонента, что характерно для насадочных колонн. Однако эти уравнения можно применять для процесса ректификации в многотарельчатых колоннах, в которых массообмен между фазами происходит в основном на тарелках.

Влияние гидродинамических явлений на процесс массообмена можно выразить зависимостью коэффициента массообмена от величины парового потока $k_y = kV$, где k определяется по экспериментальным данным [1].

Такая зависимость является приемлемым приближением для некоторых режимов работы ректификационной колонны. Равновесная концентрация в паре определяется по концентрации компонентов X_i эмпирической зависимостью $y_i^* = (P_{1i} T_k^2 + P_{2i} T_k + P_{3i}) / P$, где P – давление в колонне; T_k – температура кипения жидкости; P_{1i} , P_{2i} , P_{3i} – коэффициенты, полученные по эмпирической зависимости давления чистых компонентов от температуры методом наименьших квадратов, $i = \overline{1, N}$.

Рассмотрим ввод потоков сырья в ректификационную колонну не по всей длине, а в некоторой ее части, которую будем называть областью ввода. Функции $\rho_{1f_i}(l, t)$, $\rho_{2f_i}(l, t)$, определяющие плотности потоков i -го компонента по длине колонны, находятся следующим образом:

$$\rho_{1f_i} = F_L(t) x_{f_i}(t) f_i(l), \quad \rho_{2f_i} = F_V(t) y_{f_i}(t) f_i(l),$$

где $F_L(t)$, $F_V(t)$ – потоки сырья в жидкой и паровой фазах; $x_{f_i}(t)$, $y_{f_i}(t)$ – концентрация i -го компонента в сырье. Система (1), как было показано в [1], может быть приведена к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{1i}}{\partial t} - c_1 \frac{\partial \rho_{1i}}{\partial z} &= k_y (y_i - y_i^*) + \rho_{1f_i}, \\ \frac{\partial \rho_{2i}}{\partial t} + c_2 \frac{\partial \rho_{2i}}{\partial z} &= k_y (y_i^* - y_i) + \rho_{2f_i}, \quad 1 \leq i \leq N. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, имеем систему уравнений в частных производных с постоянными коэффициентами. Функции x_i и y_i определяются теперь следующим образом:

$$x_i = \frac{\rho_{1i}}{\sum_{j=1}^N \rho_{1j}}, \quad y_i = \frac{\rho_{2i}}{\sum_{j=1}^N \rho_{2j}}.$$

Система уравнений (2) описывает процесс массообмена, происходящий внутри ректификационной колонны. Кроме этого, необходимо учесть процессы, протекающие в кубе и дефлегматоре, которые находятся в концах колонны. Уравнения, описывающие процессы в кубе и дефлегматоре, определяют граничные условия для системы уравнений (2).

Начальные условия имеют вид

$$\rho_{1i}(l, 0) = \varphi_{1i}(l), \quad \rho_{2i}(l, 0) = \varphi_{2i}(l), \quad 1 \leq i \leq N. \quad (3)$$

Постановка краевой задачи. В большинстве случаев процесс ректификации осуществляется с рециркуляцией выходных потоков в кубе и дефлегматоре. Граничные условия для этих уравнений задаются на границе $l = L$, $l = 0$. Значения концентрации компонентов в дефлегматоре определяются по уравнению покомпонентного материального баланса для дефлегматора

$$\frac{d(H_{xd} x_{di}(t))}{dt} = c_2 \rho_{2i}(L, t) - L_d(t) x_{di}(t) - D(t) x_{di}(t). \quad (4)$$

Начальные условия для уравнения (4) следующие:

$$x_{di}(0) = \frac{\varphi_{li}(L)}{\sum_{j=1}^N \varphi_{1j}(L)}. \quad (5)$$

Аналогично задаются граничные уравнения для остальных N уравнений системы (2). Граничные условия задаются также в точке $l = 0$.

Концентрации компонентов жидкости, находящейся в кубе, определяются по уравнениям покомпонентного материального баланса для куба:

$$\frac{d(H_{xk} x_{ki}(t))}{dt} = c_1 \rho_{li}(0, t) - W(t) x_{ki}(t) - V_0(t) y_i(0, t), \quad (6)$$

$$x_{ki}(0) = \frac{\varphi_{li}(0)}{\sum_{j=1}^N \varphi_{1j}(0)}. \quad (7)$$

Итак, сформулированная краевая задача (2)...(7) является математической моделью работы ректификационной колонны без системы регулирования в нестационарном режиме. Решение этой краевой задачи не всегда имеет технологический смысл, который для ректификационной колонны соответствует аварийному режиму работы. При этом происходит залив колонны или ее исчерпывание. С помощью системы регулирования поддерживаются такие значения входных и выходных потоков, чтобы выполнялся внешний материальный баланс для колонны. В математической модели это можно отразить следующим образом: $F_L(t) + F_V(t) = D(t) + W(t)$.

Численный метод решения краевой задачи. Так как решить аналитически сформулированную краевую задачу не удастся, то для этого следует применить численный метод [2]. Рассмотрим алгоритм численного решения краевой задачи (2)...(10). Для этого область решения покроем равномерной сеткой с шагом Δt по временной координате и с шагом Δl по пространственной. Для решения уравнений на сетке выбран трехточечный шаблон.

Заменим производные в уравнениях соответствующими конечно-разностными соотношениями:

$$\frac{\rho_{li}^{n+1m} - \rho_{li}^{nm}}{\Delta t} - c_1 \frac{\rho_{li}^{n+1m+1} - \rho_{li}^{n+1m}}{\Delta l} = k_y^{nm} (y_i^{nm} - y_i^{*nm}) + \rho_{1fi}^{nm},$$

$$\frac{\rho_{2i}^{n+1m} - \rho_{2i}^{nm}}{\Delta t} + c_1 \frac{\rho_{2i}^{n+1m+1} - \rho_{2i}^{n+1m}}{\Delta l} = k_y^{nm} (y_i^{*nm} - y_i^{nm}) + \rho_{2fi}^{nm},$$

$$k_y^{nm} = kc_2 \sum_{j=1}^N \rho_{2j}^{nm}, y_i^{*nm} = (P_{1i} T^{nm})^2 + P_{2i} T^{nm} + P_{3i} x_i^{nm} / P^m,$$

$$T^{nm} = -B^{nm} + \sqrt{(B^{nm})^2 - 4A^{nm}C^{nm}} / 2A^{nm},$$

$$A^{nm} = \sum_{j=1}^N P_{1j} x_j^{nm}, B^{nm} = \sum_{j=1}^N P_{2j} x_j^{nm}, C^{nm} = \sum_{j=1}^N P_{2j} x_j^{nm} - P^m,$$

$$P_m = P_H - (P_H - P_B) m \Delta l / L,$$

$$x_i^{nm} = \rho_{li}^{nm} / \sum_{j=1}^N \rho_{1j}^{nm}, y_i^{nm} = \rho_{2i}^{nm} / \sum_{j=1}^N \rho_{2j}^{nm},$$

где L – длина объекта.

Начальные условия при $l = 0$ примут вид $\rho_{li}^{nm} = \varphi_{li}^m$, $\rho_{2i}^{nm} = \varphi_{2i}^m$, граничные условия при $l = 0$ переписутся следующим образом:

$$\rho_{2i}^{n+1} = V_0 y_{ki}^{n+1} / c_2, y_{ki}^{n+1} = (P_{1i} T^{n+1} + P_{2i} T^{n+1} + P_{3i}) x_{ki}^{n+1} / P^1,$$

$$\frac{H_{xk}^{n+1} x_{ki}^{n+1} - H_{xk}^n x_{ki}^n}{\Delta t} = c_1 \rho_{li}^{n+1} - V_0 y_{ki}^n - W^n x_{ki}^n, x_{ki}^1 = \frac{\varphi_{li}^1}{\sum_{j=1}^N \varphi_{1j}^1},$$

$$V_0^n = c_1 \sum_{j=1}^N \rho_{1j}^n - W^n;$$

при $l = L$:

$$\rho_{li}^{n+1M} = L_d^{n+1} x_{di}^{n+1} / c_1,$$

$$\frac{H_{xd}^{n+1} x_{di}^{n+1} - H_{xd}^n x_{di}^n}{\Delta t} = c_2 \rho_{2i}^{nM} - x_{di}^n c_2 \sum_{j=1}^N \rho_{2j}^{nM},$$

$$x_{di}^1 = \frac{\varphi_{li}^M}{\sum_{j=1}^N \varphi_{1j}^M}, \frac{H_{xd}^{n+1} - H_{xd}^n}{\Delta t} = c_2 \sum_{j=1}^N \rho_{2j}^{nM} - L_d^n - D^n, H_{xd}^1 = c_3.$$

Для определения коэффициента k используются экспериментальные данные. В работе [3] приведены значения концентраций в выходных продуктах для двенадцати статических режимов колонны К-34. Для каждого режима найдено такое значение коэффициента k , при котором расчетные значения выходных концентраций имеют наименьшее отклонение от экспериментальных данных, и взято среднее арифметическое значение этого коэффициента. Среднее значение коэффициента для К-34 равно 0,395, что близко к проектным значениям КПД тарелок. Разброс значений для коэффициента можно объяснить следующими факторами:

- недостаточной точностью измерения концентрации;
- получением экспериментальных данных не в статическом режиме (для некоторых режимов не соблюдается покомпонентный материальный баланс);
- неполной адекватностью математической модели реальному процессу.

Оптимальное управление в замкнутой системе с измерением параметров в точках, распределенных по длине аппарата. Применить на практике непрерывное измерение удастся в лишь редких случаях, поэтому приходится пользоваться измерением параметров в некоторых точках. В связи с этим возникает вопрос нахождения оптимальных координат точек измерения и весовых коэффициентов. Рассмотрим решение такой задачи при заданном числе точек измерения. Запишем для случая дискретного измерения уравнение обратной связи [4; 5]

$$u_j(t) = u_j^0(t) + \sum_{k=1}^3 \sum_{s=1}^R k_{sj}^k \int_0^L \alpha_k(l, t) e^{-c(l-l_j)^2} dl, \quad (8)$$

где $u_j(t), u_j^0(t)$ – управляющие функции; R – количество точек измерения k -й измеряемой функции j -й управляющей функции; l_{sj}^k – координата s -й точки k -й измеряемой функции j -й управляющей функции; k_{sj}^k – весовые коэффициенты; $\alpha_k(l, t)$ – контролируемый параметр.

На координаты точек измерения накладываются ограничения:

$$0 \leq l_{sj}^k \leq L, \quad 1 \leq j \leq 8, \quad 1 \leq k \leq 3, \quad 1 \leq s \leq R. \quad (9)$$

Задачу оптимального управления в замкнутой системе с дискретным измерением можно сформулировать следующим образом: во множестве действительных чисел необходимо найти такие значения параметров k_{sj}^k и l_{sj}^k , при которых решение системы уравнений (2)...(7) дает минимум функционалу S с учетом ограничений (9):

$$S = \sum_{i=1}^N \int_0^T [k_{li}^k (x_{di}(t) - \theta_{li})^2 + k_{2i}^k (x_{2i}(t) - \theta_{2i})^2] dt, \quad (10)$$

где k_{li}^k, k_{2i}^k – коэффициенты, определяющие ценность i -го компонента; θ_{li}, θ_{2i} – заданные числовые значения концентраций выходных продуктов; $x_{ki}(t), x_{di}(t)$ – состав выходных потоков; T – время управления.

Необходимые условия оптимальности содержат следующую сопряженную задачу:

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial t} - c_1 \frac{\partial \xi_i}{\partial l} = \frac{k_y}{PL} \left((\xi_i - \eta_i) P_i + \sum_{j=1}^8 A_{ij} + \sum_{j=1}^N (\xi_j - \eta_j) \rho_{1j} \frac{p_j L - P c_1}{L} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial t} + c_2 \frac{\partial \eta_i}{\partial l} = c_2 k_y \left((\eta_i - \xi_i) + \sum_{j=1}^N y_j^* (\xi_j - \eta_j) \right)$$

с начальными условиями

$$\xi_i(l, T) = \alpha_{2i}'(l, T) \sum_{j=1}^8 \sum_{s=1}^R \omega_j(T) g_{sj}^k, \eta_i(l, t) = 0 \quad (12)$$

и граничными условиями при $l = 0, 0 \leq t \leq T$:

$$\xi_i(0, t) = \sum_{j=1}^N x_{kj}(t) \left[\frac{\lambda_{kj}^2(t)}{H_{sk}} - \frac{\lambda_{kj}^1(t)}{c_2} \right] - \sum_{j=1}^8 \sum_{r=1}^R \frac{\alpha_{3i}'(0, t) g_{jr}^k(0)}{c_1}, \lambda_{kj}^1(t) = c_2 \eta_i(0, t),$$

$$\frac{d\lambda_{ki}^2(t)}{dt} = -\lambda_{ki}^1(t) \frac{L_0(t) - u_1(t) - u_4(t) + u_7(t)}{c_2} +$$

$$+ \frac{\lambda_{ki}^2(t) L_0(t)}{H_{sk}} + 2k_{2i} [x_{ki}(t) - \theta_{2i}(t)] \lambda_{ki}^2(T) = 0; \quad (13)$$

при $l = L, 0 \leq t \leq T$:

$$\eta_i(L, t) = \frac{\lambda_{di}^2(t) - \sum_{j=1}^N \lambda_{di}^2(t)}{H_{sd}} + \lambda_{di}^3(t), \lambda_{di}^1(t) =$$

$$= c_1 \xi_i(L, t) - \sum_{j=1}^8 \sum_{r=1}^R \omega_j(t) \alpha_{3i}'(L, t) g_{jr}^k(L),$$

$$\frac{d\lambda_{di}^2(t)}{dt} = \frac{\lambda_{di}^1(t) u_8(t)}{c_1} + \frac{\lambda_{di}^2(t) V_0(t)}{H_{sd}} + 2k_{1i} [x_{di}(t) - \theta_{1i}(t)] \lambda_{di}^2(T) = 0,$$

$$\frac{d\lambda_{di}^3(t)}{dt} = \sum_{j=1}^N \lambda_{dj}^2(t) \frac{c_2 \rho_{2j}(L, t) - x_{dj}(t) V_0(t)}{H_{sd}^2}, \lambda_{di}^3(T) = 0, \quad (14)$$

где

$$A_{ji} = \omega_j(t) \left[\sum_{k=1}^3 \sum_{r=1}^R \frac{\partial \alpha_k(l, t)}{\partial p_{1i}(l, t)} g_{jr}^k(l) - \sum_{r=1}^R \frac{\partial \alpha_{3i}'(l, t)}{\partial l} g_{jr}^k(l) \right] -$$

$$- \frac{\partial \omega_j(l, t) \alpha_{2i}'(l, t)}{\partial t} \sum_{r=1}^R g_{jr}^k(l);$$

$$g_{jr}^k(l) = k_{jr}^k e^{-c(l-t_{jr}^k)^2}.$$

Таким образом, задача оптимизации управления в замкнутой системе с дискретным измерением сводится к решению системы уравнений (2)...(8), (11)...(14) с учетом (9). Эта задача решается численным методом итерационно. При некоторых начальных значениях параметров l_{jr}^k и k_{jr}^k две крайние задачи (2)...(7) и (11)...(14) решаются последовательно методом конечных разностей. Затем находятся значения величин $(v_{jr}^k)_k$ и $(v_{jr}^k)_l$. Новые значения параметров l_{jr}^k и k_{jr}^k определяются по формулам

$$(k_{jr}^k)^{i+1} = (k_{jr}^k)^i - \lambda_{jr}^{k(1)} (v_{jr}^k)_k, (l_{jr}^k)^{i+1} = (l_{jr}^k)^i - \lambda_{jr}^{k(2)} (v_{jr}^k)_l,$$

где i – номер итерации; $\lambda_{jr}^{k(1)}, \lambda_{jr}^{k(2)}$ – коэффициенты, которые выбираются такими, чтобы на каждой итерации происходило уменьшение функционала (10).

Численное решение задачи оптимизации. Приведем в качестве примера решение задачи стабилизации состава выходных продуктов при возмущении по составу сырья. Суть задачи следующая: при работе ректификационной колонны в статическом режиме возникает возмущение по составу сырья и необходимо с помощью системы управления поддерживать постоянный состав выходных потоков, такой же, как в статическом режиме. Рассмотрим решение задачи при управлении в замкнутой систе-

ме с наиболее эффективной управляющей функцией $D(t)$ (величина отбора верхнего продукта) для дискретного измерения параметров.

На основе разработанных алгоритмов проведено численное исследование систем оптимального регулирования при различных типах регуляторов и различных возмущениях. В качестве объекта управления взята колонна К-34 (дебутанизатор) установки сернокислотного алкилирования изобутана бутиленами. Расчеты проводились для двух видов возмущений по составу сырья X^2 (рис. 1); ступенчатого (рис. 1, а) и линейного (рис. 1, б).

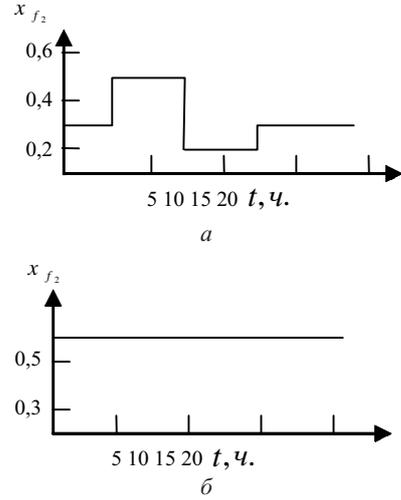


Рис. 1. Возмущения по концентрации бутана в сырье

Начальные значения коэффициентов усиления регуляторов следующие: для П-регулятора сверху колонны $K_{ин}^0 = 9000$, внизу $K_{ин}^0 = 15000$; для И-регулятора сверху колонны $K_{ин}^0 = 0,05$, внизу $K_{ин}^0 = 0,05$; для Д-регулятора сверху колонны $K_{ин}^0 = 28000$, внизу $K_{ин}^0 = 28000$. Оптимизация процесса управления осуществляется с помощью двух регуляторов внизу и сверху колонны. Соответ-

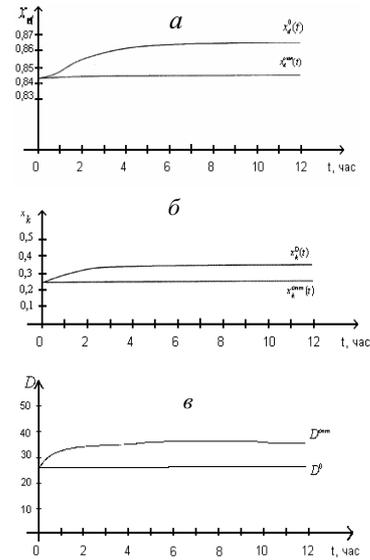


Рис. 2. Начальные и оптимальные значения концентраций компонентов целевого продукта при ступенчатом возмущении в системе с П-регулятором: а – сверху колонны (x_d^0 и $x_d^{опт}(t)$); б – внизу колонны (x_k^0 и $x_k^{опт}(t)$); в – управляющего потока (D^0 и $D^{опт}(t)$)

ственно оптимизируемый функционал содержит квадраты отклонений концентрации компонентов вверху и внизу колонны.

Приведем начальное и оптимальное изменения управляющего потока отбора верхнего продукта $D^0, D^{opt}(t)$ в системе управления с П-регулятором (рис. 2). Начальное значение показателя качества одинаково для всех регуляторов при ступенчатом возмущении и равно $F = 17,334\ 76 = 0,772\ 19 + 16,562\ 57$. Первое слагаемое в последней сумме означает часть показателя качества для верхнего продукта, второе слагаемое – для нижнего продукта. Оптимальные значения коэффициента усиления для П-регулятора $K_{ин}^{opt} = 10\ 500, K_{ин}^{opt} = 18\ 000, F^{opt} = 0,004\ 394 = 0,004\ 310 + 0,000\ 084$.

Оптимальные и начальные значения управляемых и управляющего параметров в системе с И-регулятором (рис. 3) следующие: $K_{ув}^{opt} = 1,90, K_{ин}^{opt} = 1,90, F^{opt} = 0,679301 = 0,014596 + 0,664705$. Отметим, что у системы с И-регулятором показатели качества хуже, чем у системы с П-регулятором.

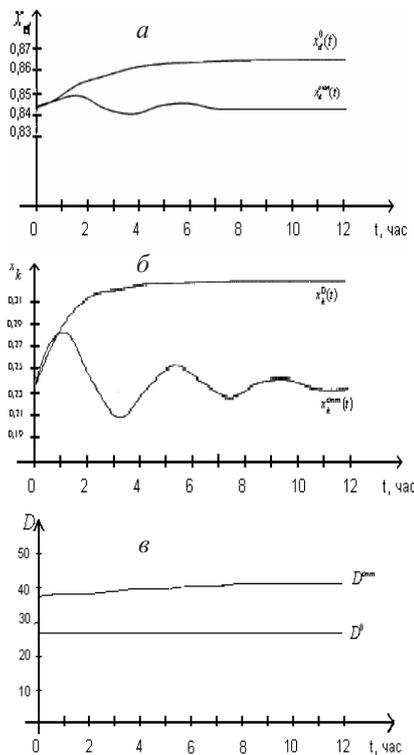


Рис. 3. Начальные и оптимальные значения концентраций компонентов целевого продукта при ступенчатом возмущении в системе с И-регулятором: а – вверху колонны (x_d^0 и $x_d^{opt}(t)$); б – внизу колонны (x_k^0 и $x_k^{opt}(t)$); в – управляющего потока (D^0 и $D^{opt}(t)$)

Представим результаты расчетов системы регулирования с Д-регулятором (рис. 4):

$$F^{opt} = 0,013482 = 0,012405 + 0,001077, K_{об}^{opt} = K_{он}^{opt} = 329000.$$

Получены следующие результаты расчетов оптимальных параметров с ПИ-регулятором (рис. 5): $K_{об}^{opt} = 10500, K_{ин}^{opt} = 18000, K_{ув}^{opt} = 0,93, K_{ин}^{opt} = 0,91, F^{opt} = 0,004375 = 0,004244 + 0,000131$. Управление в этом случае более качественное, чем в системах отдельными П- и И-регуляторами.

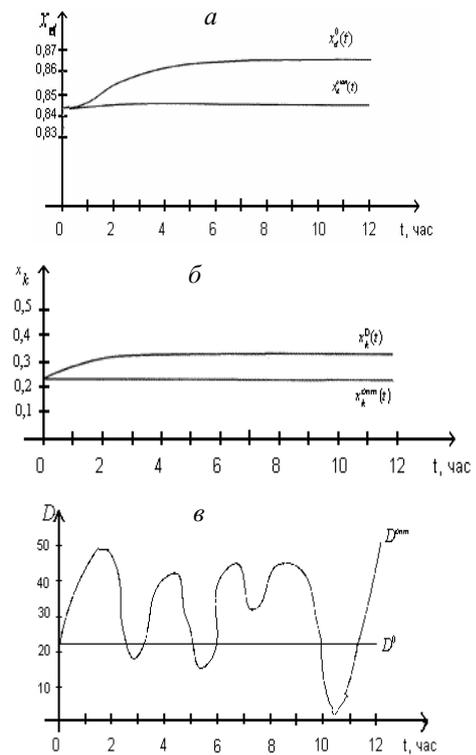


Рис. 4. Начальные и оптимальные значения концентраций компонентов целевого продукта при ступенчатом возмущении в системе с Д-регулятором: а – вверху колонны (x_d^0 и $x_d^{opt}(t)$); б – внизу колонны (x_k^0 и $x_k^{opt}(t)$); в – управляющего потока (D^0 и $D^{opt}(t)$)

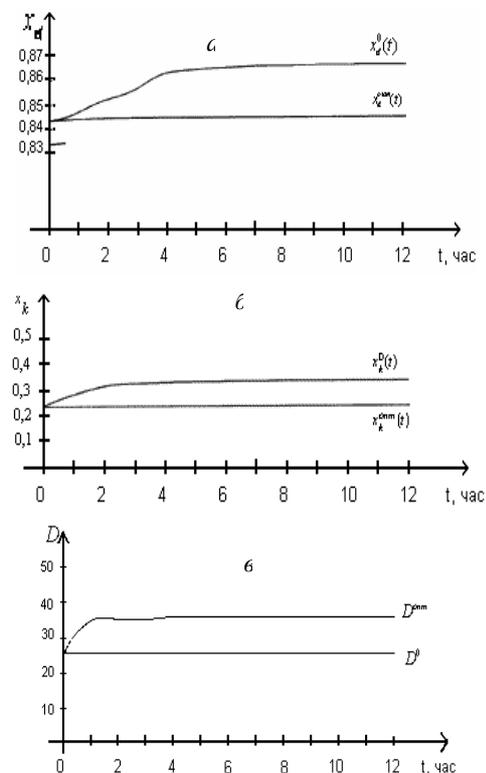


Рис. 5. Начальные и оптимальные значения концентраций компонентов целевого продукта при ступенчатом возмущении в системе с ПИ-регулятором: а – вверху колонны (x_d^0 и $x_d^{opt}(t)$); б – внизу колонны (x_k^0 и $x_k^{opt}(t)$); в – управляющего потока (D^0 и $D^{opt}(t)$)

Приведем результаты расчетов с ИД-регулятором (рис. 6):
 $F^{opt} = 0,02294 = 0,00888 + 0,014061$, $K_{\partial\sigma}^{opt} = K_{\partial H}^{opt} = 331000$.

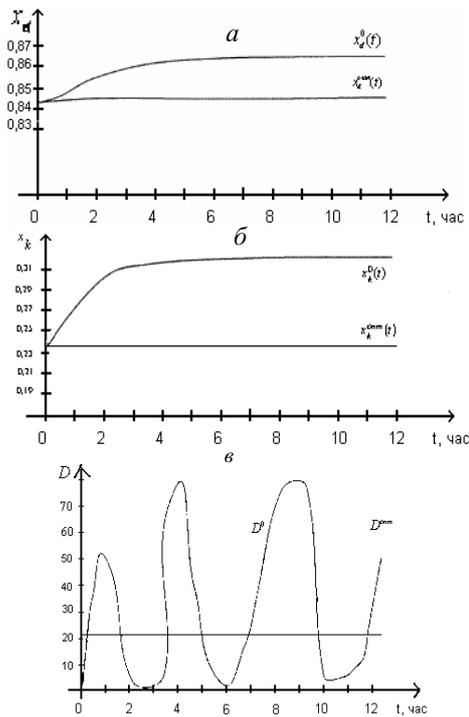


Рис. 6. Начальные и оптимальные значения концентраций компонентов целевого продукта при ступенчатом возмущении в системе с ИД-регулятором: а –верху колонны (x_d^0 и $x_d^{opt}(t)$); б – внизу колонны (x_k^0 и $x_k^{opt}(t)$); в – управляющего потока (D^0 и $D^{opt}(t)$)

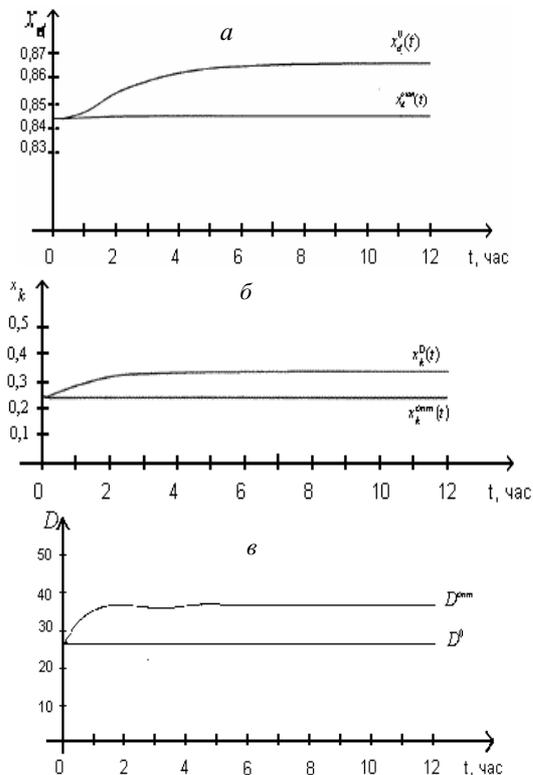


Рис. 7. Начальные и оптимальные значения концентраций компонентов целевого продукта при ступенчатом возмущении в системе с ИД-регулятором: а –верху колонны (x_d^0 и $x_d^{opt}(t)$); б – внизу колонны (x_k^0 и $x_k^{opt}(t)$); в – управляющего потока (D^0 и $D^{opt}(t)$)

Результаты расчетов с ПИД-регулятором следующие (рис. 7): $F^{opt} = 0,004378 = 0,004297 + 0,000081$. $K_{\partial\sigma}^{opt} = 10500$, $K_{\partial H}^{opt} = 18000$, $K_{\partial\sigma}^{opt} = 0,03$, $K_{\partial H}^{opt} = 0,01$, $K_{\partial\sigma}^{opt} = 75000$, $K_{\partial H}^{opt} = 25000$. Регуляторы П, ПИ, ПИД равнозначны по результату регулирования при управлении качеством верхнего и нижнего продуктов.

Приведем результаты расчетов систем авторегулирования при линейном возмущении по составу сырья (см. рис. 1, б) с регуляторами П, Д, ПИ: $F^0 = 5,485232 = 0,178581 + 5,306651$. Для П-регулятора $F^{opt} = 0,009916 = 0,001835 + 0,008081$, $K_{\partial\sigma}^{opt} = 84000$, $K_{\partial H}^{opt} = 28000$. Для Д-регулятора $F^{opt} = 0,119634 = 0,006448 + 0,113186$, $K_{\partial\sigma}^{opt} = 240000$, $K_{\partial H}^{opt} = 250000$ (рис. 9). Для ПИ-регулятора $F^{opt} = 0,001856 = 0,001383 + 0,000472$, $K_{\partial\sigma}^{opt} = 14000$, $K_{\partial H}^{opt} = 18000$, $K_{\partial\sigma}^{opt} = 0,2$, $K_{\partial H}^{opt} = 0,05$.

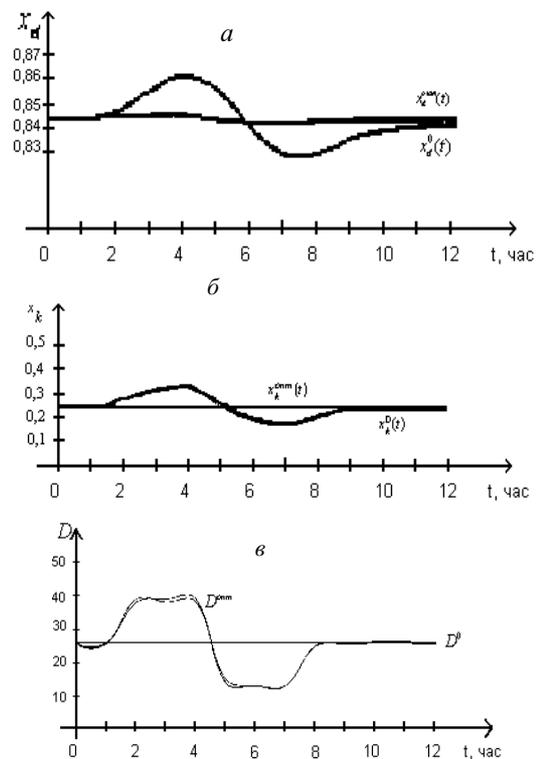


Рис. 8. Начальные и оптимальные значения концентраций компонентов целевого продукта для систем авторегулирования с П-регулятором: а –верху колонны (x_d^0 и $x_d^{opt}(t)$); б – внизу колонны (x_k^0 и $x_k^{opt}(t)$); в – управляющего потока (D^0 и $D^{opt}(t)$)

Для всех схем регулирования менее эффективным по сравнению с другими типами регуляторов является Д-регулятор. В промышленных же условиях в основном используют ПИ-регулятор. Проведенные расчеты подтверждают этот факт, но разработанные алгоритмы, представленные в данной статье, тем не менее могут применяться для проектирования систем авторегулирования, обеспечивая необходимую для этого информацию и различные качественные оценки проектируемой системы и управляемого процесса.

Во всех численных экспериментах на первой итерации происходит принципиальное улучшение показателя качества, а затем значения этого показателя либо улучшаются незначительно, либо колеблются вокруг значе-

ния оптимального управления. Число итераций не превышает трех.

Библиографический список

1. Демиденко, Н. Д. Управляемые распределенные процессы / Н. Д. Демиденко. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1999. 394 с.
 2. Демиденко, Н. Д. Оптимизационные задачи управления процессами разделения / Н. Д. Демиденко, Ю. А. Терещенко // Вычислительные технологии. 2000. Т. 5. № 6. С. 36–44.

3. Демиденко, Н. Д. Моделирование, распределенный контроль и управление процессами ректификации / Н. Д. Демиденко, Н. П. Ушатинская. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 288 с.
 4. Demidenko, N. D. Modelling of optimal regimes in chemical engineering objects with interacting flow recirculation / N. D. Demidenko // Syst. Anal. Model. Simul. 1987. Vol. 4. P. 309–320.
 5. Demidenko, N. D. Problems on optimization of information measuring systems with distributed parameters / N. D. Demidenko // Syst. Anal. Model. Simul. 1990. Vol. 11–12. P. 907–920.

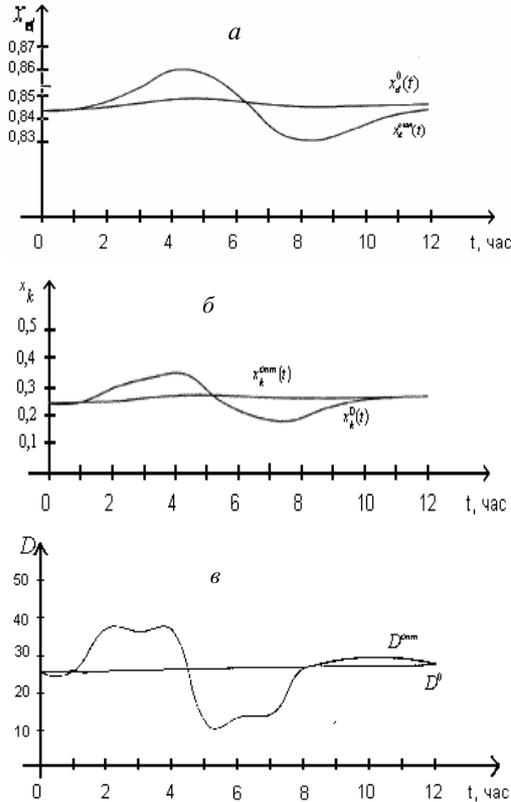


Рис. 9. Начальные и оптимальные значения концентраций компонентов целевого продукта для систем авторегулирования с D-регулятором: а –верху колонны (x_d^0 и $x_d^{opt}(t)$); б – внизу колонны (x_k^0 и $x_k^{opt}(t)$); в – управляющего потока (D^0 и $D^{opt}(t)$)

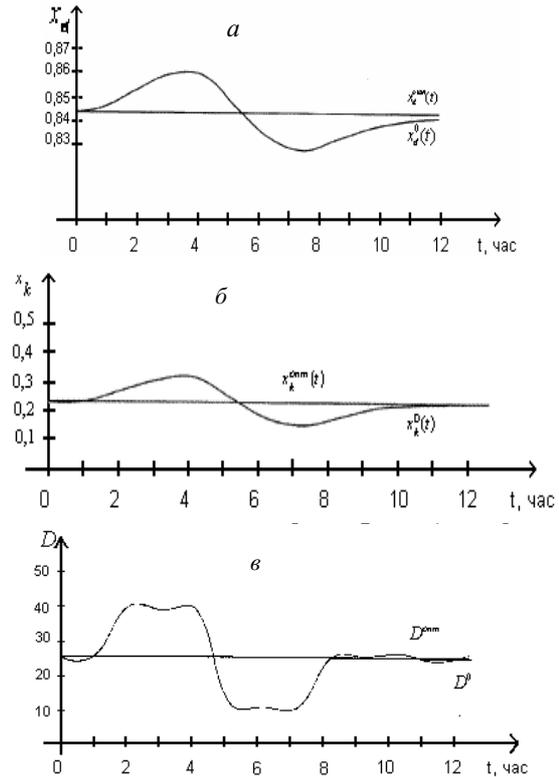


Рис. 10. Начальные и оптимальные значения концентраций компонентов целевого продукта для систем авторегулирования с ПИ-регулятором: а –верху колонны (x_d^0 и $x_d^{opt}(t)$); б – внизу колонны (x_k^0 и $x_k^{opt}(t)$); в – управляющего потока (D^0 и $D^{opt}(t)$)

N. D. Demidenko, J. A. Tereschenko, E. N. Melnik

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

It is stated the problem of optimal control processes of multicomponent mixtures division. It is obtained the necessary optimal conditions. It is developed the numerical method of optimization problems solving. It is carried out numerical experiment.

О. К. Дударев, В. А. Охорзин

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ ПЕРЕВОДА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА КРУГОВОЙ ОРБИТЕ

Приводятся результаты численного исследования задачи перевода космического аппарата на круговой орбите. Для решения задачи используется метод моментов Н. Н. Красовского. В ходе исследования получены следующие результаты: множество компромисса между расходом топлива и временем быстрогодействия; зависимости времени быстрогодействия от различных начальных отклонений по углу, эксцентриситету и периоду обращения. Результаты расчетов обработаны, и выведены простые зависимости для оценки минимально необходимого времени управления в задаче перевода.

Рассмотрим следующую задачу терминального управления динамической системой, описываемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u), \quad x(0) = x^0, \quad x(T) = x^k, \quad x \in R^m, \quad u \in R^n, \quad u \in U, \quad t \in [0, T]. \quad (1)$$

Линеаризация уравнений в окрестности круговой орбиты дает следующую систему линейных дифференциальных уравнений [1]:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x(0) = x^0, \quad x(T) = x^k, \quad x \in R^4, \quad u \in R^1, \quad |u| \leq u_m, \quad t \in [0, T], \quad (2)$$

где $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, x_1 – отклонение

от круговой орбиты по радиусу; x_2 – отклонение по радиальной скорости; x_3 – отклонение по угловой скорости; x_4 – отклонение по углу; u_1 – трансверсальное ускорение; u_2 – радиальное ускорение; u_m – предельное значение ускорений. Все переменные – безразмерные, за единицу длины принята высота геостационарной орбиты $R_c = 42\,164$ км, за единицу времени взят период обращения КА на геостационарной орбите $T = 24$ ч.

Метод моментов Н. Н. Красовского является одним из эффективных методов решения терминальной задачи оптимального управления линейной динамической системой. Его преимущества связаны с тем, что решение задачи сводится к минимизации выпуклой функции, размерность которой равна размерности уравнений движения, в результате чего не возникает необходимости решать краевую задачу, как в принципе максимума, или иметь задачу большей размерности, как в методах параметрической оптимизации. Для решения задачи управления с помощью этого метода требуется лишь знание собственных функций управляемой системы.

Суть проблемы моментов состоит в следующем. Пусть даны n линейно-независимых функций $g_i(t)$, не равных нулю вектор моментов α_i , $i = 1, 2, \dots, n$, функции $u(t)$ и число $l > 0$. Требуется найти условия существования функции $u_n(t) \in L^s(0, t_k)$, $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = 1, 1 \leq s \leq \infty$, удовлетворяющей условиям

$$\int_0^{t_k} g_i(t)u_n(t)dt = \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad u_n(t) \leq l. \quad (3)$$

Для этого необходимо и достаточно, чтобы для всех векторов $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ выполнялось неравенство

$$\left| \sum_{i=0}^n \xi_i \alpha_i \right| \leq l \left(\int_0^{t_k} \sum_{i=0}^n \xi_i g_i(t) dt \right)^{1/s}. \quad (4)$$

Тогда

$$u_n(t) = \frac{1}{\lambda_n} \left| \sum_{i=0}^n \xi_i^0 g_i(t) \right|^{s'-1} \text{sign} \sum_{i=0}^n \xi_i^0 g_i(t), \quad (5)$$

$$\lambda_n = \int_0^{t_k} \left| \sum_{i=0}^n \xi_i^0 g_i(t) \right|^{s'} dt, \quad (6)$$

а вектор ξ и число λ_n определяют по результату решения следующей задачи: найти

$$\min_{\xi} \int_0^{t_k} \left| \sum_{i=0}^n \xi_i g_i(t) \right|^{s'} dt = \int_0^{t_k} \left| \sum_{i=0}^n \xi_i^0 g_i(t) \right|^{s'} dt = \lambda_n \geq l^{-s'} \quad (7)$$

при условии

$$\sum_{i=0}^n \xi_i \lambda_i = 1. \quad (8)$$

Применение этого результата к решению терминальной задачи управления в системе с постоянными параметрами

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad x(0) = x_0, \quad x(T) = x_k \quad (9)$$

основано на представлении движения линейной системы по формуле Коши:

$$-x_0 + e^{-At_k} x_k = \int_0^{t_k} e^{-A\tau} Bu(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Тогда вектор моментов вычисляются по начальным и конечным условиям:

$$\alpha = -x_0 + e^{-At_k} x_k, \quad (11)$$

в случае перевода в начало координат $\alpha = -x_0$. Векторы – функции

$$G(\tau) = e^{-A\tau} B \quad (12)$$

являются собственными функциями динамической системы и представляют собой столбцы матрицы (12).

Уравнение (9) можно рассматривать как линейную операцию

$$\varphi_u(h(\tau)) = \int_0^{t_k} h^T(\tau)u(\tau)dt, \quad (13)$$

порожденную функцией $u(\tau)$ в линейном пространстве $B\{h(\tau)\}$ с нормой линейной операции $\rho[\varphi_u h(\tau)]$ в сопряженном пространстве $B^*\{u(\tau)\}$. Норму $\rho[\varphi_u h(\tau)]$ находят по условию максимума:

$$\rho[h(\tau)] = \max_u \int_0^{t_k} h^T(\tau)u(\tau)dt. \quad (14)$$

Для пространства L^s в (5) сопряженная норма равна L^s . В других случаях ее нужно определять по условию (14). В данной работе рассмотрены интенсивности управления $\chi(u)$ и сопряженной нормы $\rho[h(\tau)]$ [2] (см. таблицу).

Ограничен модуль ускорения и моторное время	
1	$\max \left\{ \sup_{0 \leq \tau \leq T} u(\tau) , \lambda \int_0^T u(\tau) d\tau \right\}$ $\max_{\Delta} \int_{\Delta} h(\tau) d\tau$
Ограничен модуль произвольно направленного ускорения и моторное время	
2	$\max \left\{ \sup_{0 \leq \tau \leq T} \sum_{i=1}^m u_i^2(\tau), \lambda \int_0^T \left(\sum_{i=1}^m u_i^2(\tau) \right)^{1/2} d\tau \right\}$ $\max_{\Delta} \int_{\Delta} \left(\sum_{i=1}^m u_i^2(\tau) \right)^{1/2} d\tau$ <p style="text-align: center;">при $\sigma(\Delta) = \min_{\Delta \in [0, T]} (1/\lambda, T)$</p>

Пусть в управляемой системе, описываемой (2), выбрана интенсивность $\chi_2[u]$ и определена норма $\rho_2[u]$ функции $u(t)$. Необходимо найти оптимальное управление $u^0(t)$, переводящее систему из x^0 в x^k с минимальной интенсивностью $\chi[u]$.

Задача имеет решение, если существует число $\rho^0[h^0(\tau)] > 0$, где $h^0(\tau)$ – минимальная функция. Тогда интенсивность управления $\chi[u^0] = 1/\rho^0$ и принцип максимума формулируется следующим образом:

$$\int_0^T [h^0(\tau)]^T u^0(\tau) d\tau = \max_u \int_0^T [h^0(\tau)]^T u(\tau) d\tau,$$

где $h^0(\tau)$ – решение задачи на условный экстремум:

$$\min_{\xi} \rho[h] = \min_{\xi} \rho \left[\sum_{i=1}^m \xi_i g^i(\tau) \right] = \rho \left[\sum_{i=1}^m \xi_i^0 g^i(\tau) \right] = \rho[h^0] = \rho^0.$$

$$\text{при } \sum_{i=1}^m \xi_i x_i^0 = -1. \quad (15)$$

В случае отсутствия ограничений на расход топлива оптимальное управление имеет следующий вид:

$$u(t) = \frac{1}{\rho} \cdot \text{sign}(h^0(t)), \quad h^0(t) = \sum_{i=1}^m \xi_i^0 \cdot g_i(t). \quad (16)$$

Если ограничен модуль ускорения и время работы двигателей величиной $\frac{1}{\lambda} = T_a$, то

$$\chi[u] = \max \left\{ \sup_{0 \leq \tau \leq T} |u(\tau)|, \lambda \int_0^T |u(\tau)| d\tau \right\},$$

$$\rho[h] = \max_{\Delta} \int_{\Delta} |h(\tau)| d\tau,$$

где Δ – система отрезков на оси $[0, T]$ суммарной длиной Δ .

Решение задачи предельного быстродействия определяется по условию

$$\rho^0(T) = \frac{1}{u_m}. \quad (17)$$

Документ MathCAD (рис. 1) иллюстрирует решение задачи быстродействия для перевода КА, находящегося на геостационарной орбите, на угол $\pi/12$ рад, с управляющим ускорением $u = 0,001$ и временем активного полета $T_a = 10$. Правый график получен путем численного интегрирования уравнений движения КА в ньютоновском поле (1) при управлении из левого графика, полученного по результатам решения задачи моментов (17). Точность перевода характеризует достаточную точность линейной модели (2) в задаче размещения КА на стационарной орбите.

В следующем документе MathCAD (рис. 2) показано множество компромисса между расходом топлива и временем быстродействия для перевода КА на угол 15° .

Для исследования предельных по быстродействию характеристик в задаче перевода КА были численно ис-

следованы зависимости времени быстродействия от различных начальных отклонений по углу от $\pi/18$ до 2π , по эксцентриситету от 0,005 до 0,2 и по периоду обращения 0...3 600 с. Результаты расчетов были обработаны методом наименьших квадратов для определения простых зависимостей с целью оценки минимально необходимого времени управления в задаче перевода. Полученные зависимости для начального угла и соответствие оценки по формуле $T = 1,15 \cdot \sqrt{\frac{\Delta\lambda}{u_m}}$, где $\Delta\lambda$ – начальное отклонение по углу; T – время быстродействия, в сут. приведены на рис. 3.

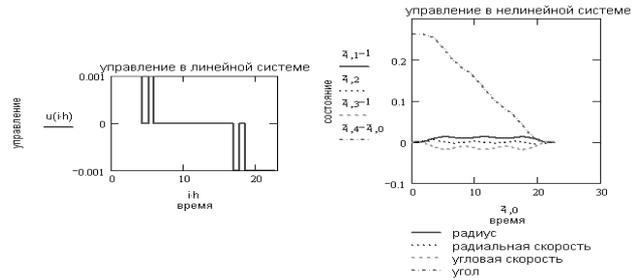


Рис. 1

Рис. 2

Рис. 3

Для оценки минимально необходимого времени перевода от начального эксцентриситета получена формула $T = \frac{(0,7 \cdot e + 38,6 \cdot e^4)}{u_m}$, а для начального отклонения по периоду обращения – формула $T = 0,936 \frac{(\Delta T - \Delta T^2)}{u_m}$, которая соответствует начальной орбите ниже геостационарной, и формула $T = 0,702 \frac{(-\Delta T + \Delta T^2)}{u_m}$, адекватная орбите выше геостационарной.

Библиографический список

1. Красовский, Н. Н. Теория управления движением / Н. Н. Красовский. М.: Наука, 1971.
2. Охорзин, В. А. Оптимальный по быстродействию перевод ИСЗ на околокруговой орбите с трансверсальной малой тягой / В. А. Охорзин // КИ. 1985. Т. XXII. Вып. 6.
3. Охорзин, В. А. Векторная оптимизация в динамических системах управления / В. А. Охорзин, О. К. Дударев // Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева: сб. науч. тр. / под ред. проф. Г. П. Белякова / САА. Вып. 1. Красноярск, 2000. С. 234–247.

О. К. Dudarev, V. A. Okhorzin

NUMERICAL RESEARCH OF THE SPACE VEHICLE TRANSFER PROBLEM IN CIRCULAR ORBIT

There are results of numerical research of the space vehicle transfer problem in circular orbit in the article. For the solution of a problem the method of the moments of N.N.Krasovsky is used. During research following results are received: set of the compromise between propellant consumption and time of response; relations of time of response to various initial deviations on an angle, an eccentricity and cycle time. Results of calculations are processed and deduced simple relations for an estimation of minimally necessary time of control in a problem of transfer.

О. Н. Жданов, В. В. Золотарев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ДЛЯ НАДЕЖНЫХ СИСТЕМ

Рассматривается метод распределения нагрузки на элементы локально распределенных систем, имеющих гетерогенную структуру узлов. Основной целью является повышение надежности функционирования системы, а также получение характеристик компонентов системы, являющихся важными для проектирования и реализации.

Распределение нагрузки на компоненты узлов локально распределенной системы базируется на ряде ее характеристик. В данной статье представлена постановка задачи, приведены полученные в ходе эксперимента данные надежности и отказоустойчивости, а также классификация методов обеспечения надежности. Затем даны краткая схема технологии и описание метода распределения нагрузки между компонентами. В заключение приведены экспериментально подтвержденные показатели, характеризующие компоненты системы и пригодные для дальнейшего использования в ее проекте.

Надежность и отказоустойчивость компонентов являются показателями, существенно влияющими на внутрисистемные взаимодействия. При формировании надежных систем с гетерогенной структурой узлов перед исследователями возникает задача распределения нагрузки (внутрисистемных транзакций данных) между компонентами узлов. Решением такой задачи может стать создание специализированного компонента, отвечающего за анализ и перенаправление потоков данных [1].

Для локально распределенных систем с количеством компонентов более двух важными являются характеристики готовности. Готовность характеризует способность объекта сохранять требуемые свойства и выполнять предназначенные функции в течение заданного срока. В представленной работе готовность рассматривается как функция двух параметров. Первым параметром является доступность – вероятность корректного ответа на запрос к системе в фиксированный момент времени. Вторым параметром – отказоустойчивость, т. е. отношение времени восстановления системы после отказа ко времени ее работы в целом за заданный промежуток времени.

Отсюда можно сделать важные выводы:

- готовность программного обеспечения является не только внутренним свойством программы;
- готовность программного обеспечения зависит от качества взаимодействия компонентов системы;
- готовность программного обеспечения (ПО) – это функция как самой системы, так и ожиданий (действий) пользователей ПО и внешних деструктивных факторов.

Следовательно, для любой системы, состоящей из иерархически организованного, функционально разделяемого набора компонентов, важной задачей является распределение между элементами потока данных, внешнего по отношению к системе. Такое распределение является функцией упомянутого выше специального компонента и реализуется в два этапа.

Первым этапом является разработка показателей, пригодных для оценки внутрисистемных взаимодействий. На втором этапе система проектируется с учетом полученных аналитических зависимостей между значимыми показателями, выбранными на первом этапе, и вносимых в проект технических, стоимостных и иных ограничений. В данной работе рассмотрен первый этап анализа.

Система, для которой разработана модель распределения нагрузки между компонентами узла, является многоузловой локально распределенной системой. Узел состоит из ряда различных программных компонентов, разбитых на блоки по функциональному признаку при декомпозиции (рис. 1 на с. 41). На практике применение систем с подобным компонентным набором ограничено достаточно широким кругом задач межсетевых взаимодействий как между кластерами локальной сети, так и между различными локально распределенными компьютерными сетями, предназначенными для управления, обработки и хранения данных.

Эксперимент над системой планировался следующим образом:

- на каждый компонент посылался поток внешних по отношению к узлу запросов;
- анализировался процент полученных откликов;
- проверялась их корректность.

В результате были получены данные, характеризующие среднюю вероятность успешной транзакции для всей системы (рис. 2).

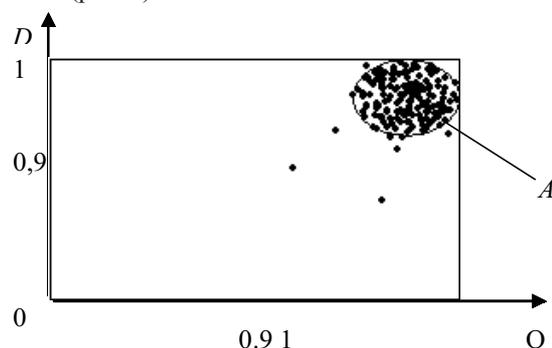


Рис. 2. Область допустимых параметров системы A , полученная на модели, учитывающей структуру узла:
 D – доступность; O – отказоустойчивость

Определенной по результатам проведенных на модели тестов области соответствует эллипс A . Отклонения от допустимых параметров, полученные после нескольких опытов, объясняются присутствием неконтролируемого внешнего фактора (сбоев программного обеспечения).

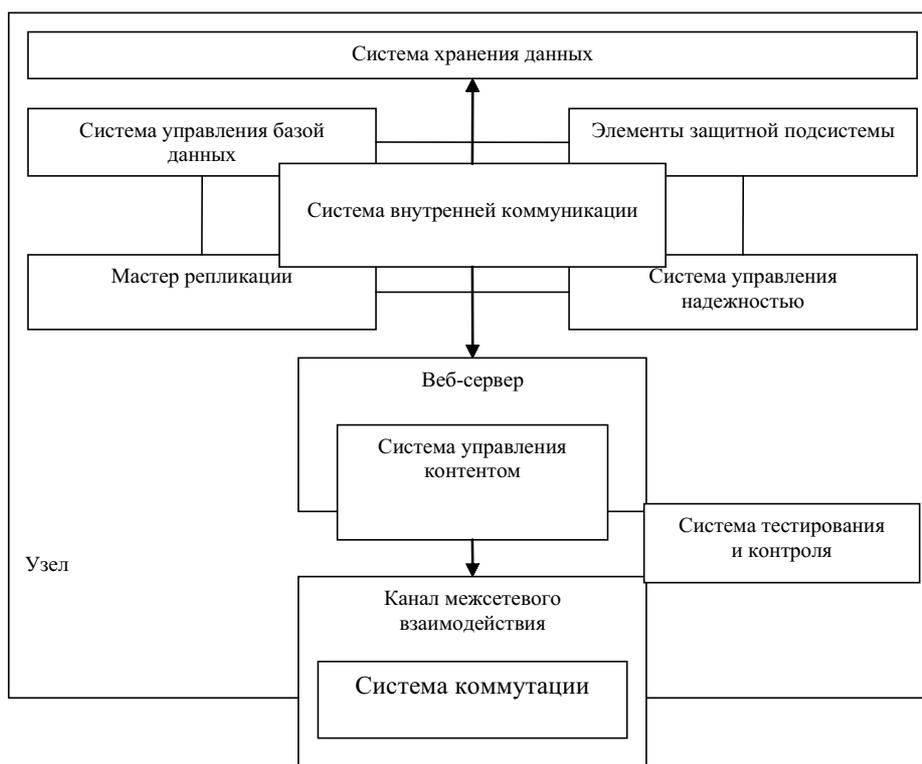


Рис. 1. Структура узла системы

Для достижения состояния системы, соответствующего высоким характеристикам ее надежности, применяется ряд методов (рис. 3) [2].



Рис. 3. Классификация методов обеспечения надежности

Среди средств, использующих временную избыточность, в качестве основных выделяются авторизация доступа пользователей к системе, анализ доступных пользователю ресурсов, выделение ресурсов согласно ролям и уровням подготовки пользователей, разграничение прав доступа пользователей к отдельным задачам, функциям управления, записям и полям баз данных.

Характерной особенностью средств, использующих информационную избыточность, является их зависимость от целостности данных. Ссылочная целостность баз данных обеспечивается за счет системы внутренних уникальных индексов для всех информационных записей системы, блочной системы шифрования на основе открытых ключей; механизмов проверки значений контрольных сумм записей системы, в том числе и сертифицированных средств контроля, которые обеспечивают выявление

всех несанкционированных модификаций (ошибок, сбоев) информации; средств регистрации, которые обеспечивают хранение информации о пользователе и времени последней модификации каждой записи информационной системы. Также применяются механизмы блокировки информации для закрытых обменов данными, контроль нарушений технологических этапов обработки информации, средства автоматического резервного копирования и восстановления данных (в начале, конце сеанса работы или по запросу пользователей).

Средства, использующие программную избыточность, применяются в комплексе с иными средствами обеспечения надежности. Ими обеспечиваются распределение реализации одноименных функций по разным модулям системы, обнаружение и регистрация ошибок в сетевом и локальных протоколах, протоколирование процессов с выдачей подробной диагностики ошибок, отладка и трассировка алгоритмов пользовательских функций.

Дополнительно используются следующие средства повышения доступности системы:

- средства, обеспечивающие устойчивость системы к ошибкам (процедура обработки сбоев позволяет в автоматическом режиме сделать несколько попыток повторного выполнения операций);
- средства динамического изменения конфигурации, контролирующие доступ к сетевым ресурсам, а в случае их недоступности или конфликта обеспечивающие автоматический запуск системы по альтернативным путям доступа;
- средства контроля и обслуживания данных, восстанавливающие заголовки баз данных и индексные файлы, конвертирующие модифицированные структуры баз данных;
- средства слияния, копирования, архивирования и восстановления данных.

Ключевой задачей при обеспечении надежного функционирования системы является предотвращение ошибок. Решение этой задачи приобретает особое значение, если передаваемая информация имеет высокую ценность. Во время сетевых транзакций данных основным тестируемым элементом системы является программное обеспечение.

Угрозы надежности программного обеспечения бывают внутренние и внешние. К внутренним угрозам относятся некорректные проектирование и алгоритмизация, недостаточное качество средств защиты, неполная или несоответствующая действительности спецификация; к внешним – не соответствующие политике безопасности и проектным ограничениям системы действия пользователей, изменения конфигурации системы, сбои и отказы аппаратуры ЭВМ, искажение информации в каналах связи.

Таким образом, для обеспечения надежности системы, состоящей из нескольких компонентов, выделенных по функциональному признаку, существенным является уровень надежности ее функционирования.

Эффективность обеспечения надежности компонентов системы будет зависеть от следующих параметров:

- эффективности исследования внешней среды, обеспечиваемой средствами информационной избыточности и устойчивости системы;
- эффективности контроля функций системы, обеспечиваемой средствами программной избыточности и динамического управления конфигурацией;
- эффективности контроля, блокировки и коррекции сбоев, обеспечиваемой средствами временной избыточности и контроля, обслуживания и хранения данных;
- экономической эффективности системы.

Для технических параметров эффективность их работы рассматривается как отношение вероятного времени простоя системы к суммарному времени ее работы. Такая оценка эффективности называется оценкой со стороны пользователя и традиционно применяется в системах с использованием доставки служб пользователям по ненадежным техническим каналам [5].

Экономическая оценка эффективности предполагает оценку безубыточности, или расчет выгоды от внедрения той или иной технологии. При этом область информационных технологий, в частности область систем обеспечения надежности программных комплексов, имеет такую особенность, что подсчет выгоды является сложной задачей, связанной со сложностью оценки самой информации и ее потоков в системе.

Для предотвращения снижения надежности системы предлагается исследование ряда параметров операционной среды и внутренних характеристик системы.

Авторами в качестве такой характеристики предложено использовать коэффициент уникальности. Это показатель, характеризующий способность компонентов системы выполнять тождественные функции, аналитически задаваемый как отношение $K_y = \frac{F}{F_c}$, где F – набор функций компонента; F_c – эталонный набор функций, с которым производится сравнение. Набор функций оценивается экспериментатором исходя из конкретных условий, с применением нормированной шкалы. Применение коэффициента уникальности позволяет с большой степенью вероятности определить успешные варианты распределения нагрузки.

Для выработки механизма распределения нагрузки важными являются следующие показатели:

- коэффициент уникальности компонентов;
- веса дуг графов, отражающих критичные сетевые транзакции;
- результаты тестирования системных компонентов;
- значения вероятностной функции доступности.

Этапы распределения нагрузки, таким образом, представлены набором действий, совершаемых системой тестирования и контроля (рис. 4).

Вес дуги графа определяется как произведение коэффициента уникальности $K_1 \dots, K_n$ на вероятность корректного клика на запрос от проверяемого компонента системы, которая определяется в ходе эксперимента над моделью, учитывающей характеристики компонентов узла.

На первом этапе производится анализ матрицы коэффициентов уникальности, встроенной в механизм тестирования, и строится графическая модель системы, соответствующая ее структурной, функциональной и логической моделям, а также иерархии компонентов.

На втором этапе, с учетом результатов первого, «слепого» тестирования, т. е. тестирования методом опроса всех компонентов системы без учета иерархии и коэффициентов уникальности, строится график вероятностного распределения, характеризующий доступность системных компонентов. Такое тестирование принимается за исходное и не имеет обратной связи.

На третьем этапе производится второе, «интеллектуальное» тестирование, учитывающее результаты исходного и увеличивающее точность измерения вероятности отказа для компонентов с высокими коэффициентами уникальности, а также находящимися в области высоких вероятностей отказа.

Четвертый этап предполагает тестирование с учетом иерархии и функциональных особенностей компонентов. На основании этого тестирования строятся графы меж-

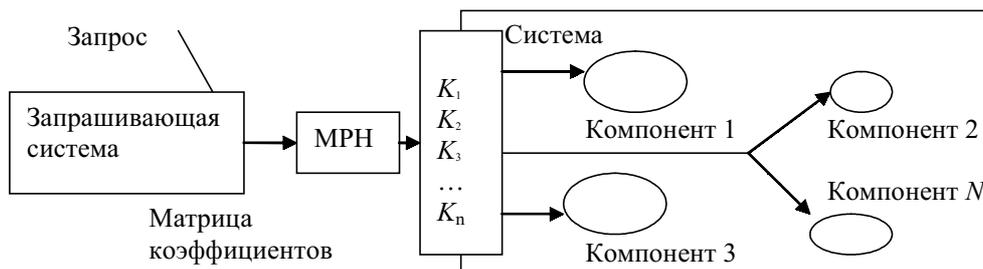


Рис. 4. Схема распределения нагрузки с учетом коэффициента уникальности

сетевых взаимодействий и определяется их вес для данной системы.

На пятом этапе происходит распределение нагрузки для элементов системы в соответствии с графами доступа, причем для описания системы применено распределение Парето [3]. Такое распределение описывается зависимостью $\Pr(X > x) \sim x - a$, $0 < a < 2$, где $\Pr(X > x)$ – вероятность превышения случайной величиной заданного числа. Для подобного распределения характерно бесконечное значение дисперсии, а при $a < 1$ – бесконечное математическое ожидание. Кроме того, оказывается, что большая часть загрузки приходится на очень малую часть (< 1 %) длинных интервалов [4].

Выделение компонентов системы, произошедшее как результат ее декомпозиции, позволяет разделить их с точки зрения задачи распределения нагрузки. Для уровня функциональной тождественности выделяются три группы элементов:

- элементы, функционально тождественные, с возможностью прямой замены;
- элементы, имеющие сходный набор функций, с возможностью косвенной замены;
- элементы, функционально нетождественные, без возможности взаимной замены.

Компоненты, разделяемые согласно структурной модели, не являются атомарными, т. е. в случае введения дополнительных критериев декомпозиции возможно их разбиение на субкомпоненты [5]. Но при этом они могут быть оценены по степени уникальности выполняемой функции и, соответственно, по возможности выполнения функций одного компонента другим без введения дополнительной избыточности или в случае использования «холодной» замены. Приведенная выше аналитическая запись коэффициента уникальности показывает, что за одну условную единицу принята тождественность функций, исполняемых отдельными компонентами. Согласно расчетам, подтвер-

жденным проведенным анализом выходных данных модели, приведенные в таблице значения коэффициента K_y могут быть применены при проектировании локально распределенных надежных систем.

Применение расчетных данных при планировании и исполнении эксперимента на модели узла системы позволило авторам определить значения коэффициента уникальности, служащего основой для построения аналитической модели потоков данных в системе. Как результат, определены направления дальнейшего анализа системы, направленного на решение задачи обеспечения надежности.

Таким образом, приведенное решение задачи распределения нагрузки, полученное в виде матрицы коэффициентов уникальности компонентов, позволяет формировать надежную систему управления, состоящую из локально распределенных узлов с гетерогенной внутренней средой. Характеристики выделенных по функциональному признаку компонентов в совокупности с полученной оценкой готовности системы позволяет формировать базовые значения показателей при проектировании надежных систем управления.

Библиографический список

1. Либман, Л. Философия распределения нагрузки / Л. Либман // LAN. 2000. № 5.
2. Майерс, Г. Надежность программного обеспечения / Г. Маерс. М.: Мир, 1980. 360 с.
3. Труб, И. Алгоритмическое обеспечение распределенных веб-серверов. / И. Труб // Открытые системы. 2003. № 5.
4. Crovella, M. Heavy-Tailed Probability Distributions in the World Wide Web. / M Crovella // Practical guide to heavy tails Chap. 1. New York: Chapman & Hall, 2004.
5. Anderson, T. Providing open architecture high availability solutions / T Anderson. Los Angeles: NA Forum, 2004.

Матрица коэффициентов уникальности

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Система хранения данных	–	0,4	0,4	0,2	0,2	0	0	0,4	0	0	0,6
Система управления базой данных	0,4	–	0,5	0,6	0,8	0,2	0,8	1	0,3	0,2	0,7
Элементы защитной подсистемы	0,4	0,5	–	0,2	0,9	0,5	0,5	0	0	0,9	1
Система внутренней коммуникации	0,2	0,6	0,2	–	0,6	0,3	0,9	0,9	0,6	0,6	0,2
Мастер репликации	0,2	0,8	0,9	0,6	–	0,8	0,4	0,8	0,6	0,3	0,5
Система управления надежностью	0	0,2	0,5	0,3	0,8	–	0,1	0,3	0,3	0	1
Веб-сервер	0	0,8	0,5	0,9	0,4	0,1	–	1	0,6	0,3	0,7
Система управления контентом	0,4	1	0	0,9	0,8	0,3	1	–	0,5	0,3	0,5
Канал межсетевого взаимодействия	0	0,3	0	0,6	0,6	0,3	0,6	0,5	–	1	0,5
Система коммутации	0	0,2	0,9	0,6	0,3	0	0,3	0,3	1	–	0,4
Система тестирования и контроля	0,6	0,7	1	0,2	0,5	1	0,7	0,5	0,5	0,4	–

O. V. Zhdanov, V. V. Zolotarev

MATHEMATICAL LOAD SHARING MODEL FOR RELIABLE SYSTEMS

Method of the load sharing is considered in article on elements of the local portioned systems with the heterogenic structure of the nodes. The main purpose is increase the reliability of the system operations, as well as reception of the system component features, being important for designing and realization.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Обсуждается задача построения моделей дискретно-непрерывных организационных процессов, имеющих трубчатую структуру. Дается краткая характеристика постановки задачи принятия решений в условиях непараметрической неопределенности. Приведены результаты исследования непараметрических алгоритмов принятия решений методом статистического моделирования.

Модели дискретно-непрерывных и организационных процессов, имеющих трубчатую структуру. Известно, что на производстве для всякого технологического процесса установлен технологический регламент, который определяет, в каком диапазоне значений должна находиться величина той или иной переменной процесса. Если значения технологического параметра оказываются за пределами этого диапазона, то такое положение классифицируется как брак. Без нарушения общности будем считать, что на вход объекта поступают две входные переменные $x_1 \in \Omega(x_1)$ и $x_2 \in \Omega(x_2)$, на выход – выходная переменная $z \in \Omega(z)$. Опять же без нарушения общности примем, что все эти области представляют собой отрезки $[0; 1]$, т. е. $\Omega(x_1) = [0; 1]$, $\Omega(x_2) = [0; 1]$, $\Omega(z) = [0; 1]$.

Рассмотрим частный случай (рис. 1). Здесь заштрихованная поверхность P представляет собой модель объекта, единичная область – куб $\Omega(x, z)$ – область допустимых значений x и z , удовлетворяющих технологическому регламенту, который и определяется областью $\Omega(x, z)$. Если мы зададим любое значение вектора $x \in \Omega(x)$, то обязательно получим $z \in \Omega(z)$. Таким образом, выход z за пределы $\Omega(z)$ при условии, что $x \in \Omega(x)$, не возможен.

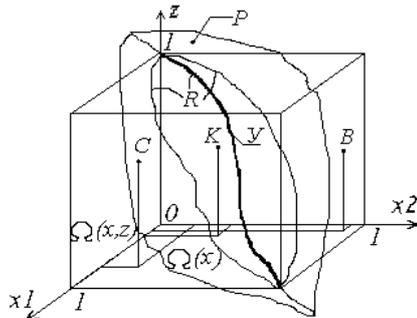


Рис. 1

Пусть области значения переменных x и z , а следовательно, и технологический регламент те же, что и в предыдущем примере, а модель представляет собой линию V в пространстве $\Omega(x, z)$. С одной стороны, справедливо считать, что область возможных значений $\Omega(x, z)$ определяется единичным кубом, но с другой – x и z принимают вовсе не все возможные значения из области $\Omega(x, z)$, а лишь те из них, которые принадлежат линии V .

Представим типичный случай, фрагментарно иллюстрирующий содержание задачи идентификации и, как представляется, адекватный многочисленным практическим ситуациям. Рассмотрим в предыдущих условиях задачу построения некоторого процесса (см. рис. 1). Здесь поверхность P представляет собой модель в евклидовом

пространстве E , $\Omega(x, z) \subset E$. Часть поверхности P , которую мы обозначим R , содержится в $\Omega(x, z)$, т. е. удовлетворяет технологическому регламенту. Точка K не принадлежит линии V (таким образом, она не может быть наблюдаемой точкой процесса), но принадлежит поверхности R и, следовательно, принадлежит области $\Omega(x, z)$, а значит и технологическому регламенту.

Точки же C и B таковы, что, хотя $x \in \Omega(x)$, но будучи подставленными в модель R , дают оценку $z \notin \Omega(z)$, т. е. не принадлежат технологическому регламенту. Следовательно, z может принять значения, физически не реализуемые. Таким образом, не только точки C и B , но и точка K являются следствием ошибки той или иной природы, и таких точек не должно быть.

Более интересным случаем является процесс, представляющий собой некоторую объемную полосу (рис. 2).

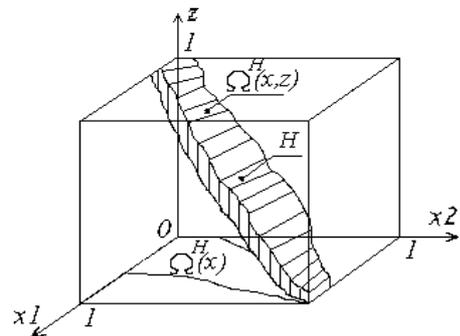


Рис. 2

Такие процессы назовем H -процессами, соответственно модели таких процессов назовем H -моделями. Значения H -процесса принадлежат области $\Omega^H(x, z)$ (причем $\Omega^H(x, z) \subset \Omega(x, z)$), т. е. технологическому регламенту. И технологический регламент должен определяться не областью $\Omega(x, z)$, как это в настоящее время делается в промышленности, а областью $\Omega^H(x, z)$. Отыскание этой области представляет собой одну из новых задач идентификации.

Другой новой задачей идентификации является построение H -моделей, а не моделей типа R , которые обычно рассматриваются при моделировании разнообразных процессов. На первый взгляд, самый простой путь построения H -моделей может состоять в том, что в качестве таких моделей принимать некоторую линию (или область, ее содержащую), полученную в результате пересечения двух моделей типа R . Но нам такой путь представляется малоэффективным.

О достоинствах H -моделей говорит тот факт, что при построении моделей многомерных процессов мы обыч-

но располагаем несколькими сотнями наблюдений, на основе которых и строится модель, удовлетворительная с точки зрения практики. Если бы эта модель была типа R , то тогда такое число наблюдений x и z было бы явно малым. А для создания H -моделей, которые требуют существенно меньше наблюдений, чем R -модели, этого количества достаточно. Кроме того, при удовлетворительно построенной модели иногда возникают случаи, когда оценки z при известных x принимают значения, не только находящиеся вне технологического регламента, но и физически вообще не реализуемые (например, содержание какого-либо элемента в продукте принимает отрицательное значение). Эти случаи мы уже обсуждали при анализе рис. 1 (точки K, C, B).

Наконец, более тщательный анализ технологического регламента показывает, что область $\Omega(x, z)$ дает очень широкий диапазон значений переменных x и z , хотя $(x, z) \in \Omega^H(x, z) \subset \Omega(x, z)$.

Таким образом, на практике мы часто имеем дело с H -процессами и, соответственно, с необходимостью строить H -модели, а не R -модели, которые представляют собой основной предмет исследования в задачах параметрической идентификации. Построение H -моделей тесно связано с задачей аппроксимации функций по наблюдениям.

Исследование алгоритмов принятия решений методом статистического моделирования. Представленные выше алгоритмы принятия решений были исследованы методами статистического моделирования. Рассмотрим следующие процессы: на входе объекта действуют 10 вещественных переменных (4 управляемых, 6 неуправляемых, но контролируемых), 5 дискретных и 5 булевых, размерность вектора выходов принята равной 3. Введем следующие обозначения: $u(t)$ – вектор управляемых переменных; $\mu(t)$ – вектор неуправляемых, но контролируемых переменных; $w(t)$ – вектор дискретных переменных; $v(t)$ – вектор булевых переменных; $x(t)$ – вектор входных переменных (рис. 3).

В качестве системы уравнений, описывающих исследуемый процесс, были приняты следующие:

1. Каждый выход объекта рассчитывался независимо от других выходов:

$$\begin{aligned} x_1 &= u_1 + 2u_2 - 2u_3 + u_4 - 2u_5 + 4u_6 - 0,1d_1 + 0,2d_2 \cdot d_3 - 0,1d_4, \\ x_2 &= u_7 - u_8 + 2,5u_9 + 1,6u_{10} + 0,1d_4 - 0,5d_5 + 0,2d_6 + 0,3d_7, \\ x_3 &= u_3 - 1,9u_4 + u_5 - 1,5u_6 - 0,2u_9 - 1,2u_{10} - 0,5d_7 + 0,5d_8 + 0,2d_9 - d_{10}, \end{aligned}$$

где $x_i, i = 1, \dots, 3$ – выходы; $u_i, i = 1, \dots, 10$ – действительные входы; $d_i, i = 1, \dots, 5$ – дискретные входы;

$d_i, i = 6, \dots, 10$ – булевы входы; g – некоторая добавка, распределенная по равномерному закону в интервале $[-0,5; 0,5]$; u_2, u_4, u_9, u_{10} – управляемые входы. При получении обучающей выборки часть входов задавалась как функция времени:

$$\begin{aligned} u_3(t) &= \frac{3t}{N} + \gamma, \quad u_4(t) = \frac{-3t}{N} + 3 + \gamma, \\ u_7(t) &= \frac{3t^2}{N^2} + \gamma, \\ u_8(t) &= \frac{-3t^2}{N^2} + 3 + \gamma, \\ u_9(t) &= 0,2 \sin\left(\frac{15t}{N}\right) + \frac{3t}{N} + 1 + \gamma, \end{aligned}$$

где N – общее количество элементов в выборке. Другая часть входов задавалась как функция ранее определенных входов:

$$\begin{aligned} u_1 &= u_3 + \gamma, \quad u_2 = u_1 + u_4, \quad u_5 = u_9 - u_4, \\ u_6 &= u_7 - u_8, \quad u_{10} = u_9 - u_6. \end{aligned}$$

2. Дискретные входы задавались следующим образом:

$$\begin{aligned} d_1(t) &= \frac{3t}{N}, \quad d_2(t) = 3 \sin\left(\frac{t}{1,5N}\right), \quad d_3(t) = 3 \sin\left(\frac{t}{N}\right), \\ d_4(t) &= \frac{-3t}{N} + 3, \quad d_5(t) = \frac{-1,5t}{N} + 3, \end{aligned}$$

при этом производилось округление до целого значения.

3. Булевы входы задавались следующим образом:

$$\begin{aligned} d_6(t) &= \cos\left(\frac{2t}{N}\right), \quad d_7(t) = \sin\left(\frac{2t}{N}\right), \quad d_8(t) = \cos\left(\frac{1,5t}{N}\right), \\ d_9(t) &= \sin\left(\frac{1,5t}{N}\right), \quad d_{10}(t) = \sin\left(\frac{t}{N}\right), \end{aligned}$$

при этом также производилось округление до целого значения (0 или 1).

4. Для получения значений управляющих переменных использовалась формула

$$u(X) = \frac{\sum_{i=1}^N u_i^l \cdot \prod_m \Phi\left(\frac{x^m - x_i^m}{c_s}\right) \cdot \prod_n \Phi(d^n - d_i^n) \prod_k \Phi\left(\frac{x^k - x_i^k}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^N \prod_m \Phi\left(\frac{x^m - x_i^m}{c_s}\right) \prod_n \Phi(d^n - d_i^n) \prod_k \Phi\left(\frac{x^k - x_i^k}{c_s}\right)},$$

где l – номер управляющего входа; m – номер выхода; n – номер дискретного (либо булевого) входа; k – номер действительного входа; Φ – колоколообразная функция, имеющая следующие значения:



Рис. 3

– для действительных входов и выходов

$$\Phi(z) = \begin{cases} \frac{1}{4}(1 - z^2), & \text{если } |z| < 1, \\ 0, & \text{если } |z| \geq 1; \end{cases}$$

– для булевых переменных

$$\Phi(z) = \begin{cases} 0, & \text{если } z = 1, \\ 1, & \text{если } z = 0; \end{cases}$$

– для дискретных переменных

$$\Phi(z) = \begin{cases} 1, & \text{если } z = 0, \\ 0, & \text{если } z > 2, \\ 0,5, & \text{если } z \leq 2, z > 0. \end{cases}$$

5. Параметр размытости c_s для каждого типа переменных подбирался с шагом 0,5.

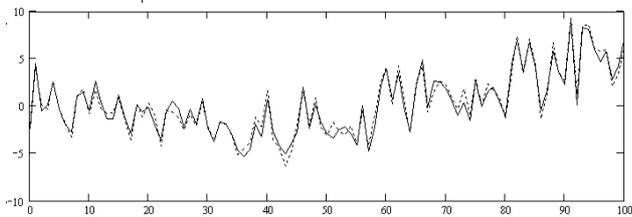
Приведенные выше системы уравнений соответствуют трубчатой структуре описания процесса. Это достигается наличием стохастической связи между входными переменными. На значение выходных переменных накладывается аддитивная помеха. Содержание задачи статистического исследования алгоритмов принятия решений состоит в том, чтобы при известных значениях входных неуправляемых переменных найти управляющее воздействие, позволяющее достичь значения выходной переменной, равного $x(t) = x^*(t)$, где $x^*(t)$ – заданное значение выходной переменной.

Представим работу непараметрического алгоритма принятия решений в графическом виде (рис. 4...9).

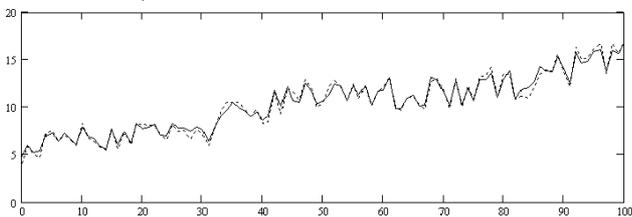
1. Выборка $N = 1\,000$, уровень помех 1 (рис. 4). Средние значения отклонений соответствующих выходов: 0,524; 0,319; 0,365. Максимальные значения отклонений соответствующих выходов: 1,589; 1,113; 1,032.

Пунктиром обозначен желаемый выход, сплошной линией – выход, получаемый в результате управления.

Выход x_1 :



Выход x_2 :



Выход x_3 :

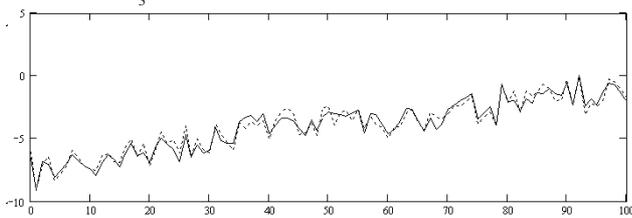


Рис. 4

В дальнейшем иллюстрацию численных исследований алгоритма без нарушения общности можно приводить только на одном выходе модели, например x_1 .

2. Выборка $N = 1\,000$, уровень помех 2 (рис. 5). Средние значения отклонений соответствующих выходов: 0,58; 0,559; 0,46. Максимальные значения отклонений соответствующих выходов: 1,909; 1,671; 1,327.

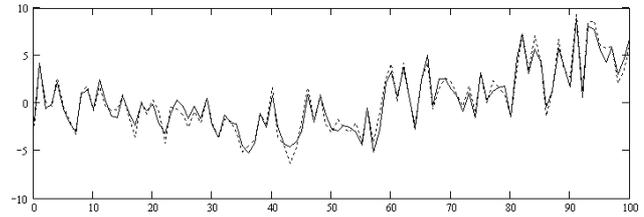


Рис. 5

3. Выборка $N = 1\,000$, уровень помех 3 (рис. 6). Средние значения отклонений соответствующих выходов: 0,659; 0,854; 0,585. Максимальные значения отклонений соответствующих выходов: 1,91; 3,228; 1,743.

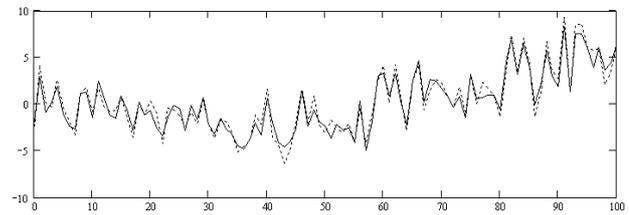


Рис. 6

4. Выборка $N = 2\,500$, уровень помех 1 (рис. 7). Средние значения отклонений соответствующих выходов: 0,398; 0,303; 0,285. Максимальные значения отклонений соответствующих выходов: 2,178; 1,102; 1,194.

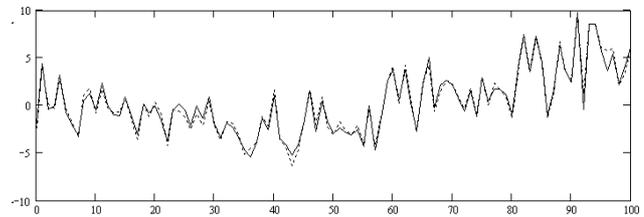


Рис. 7

5. Выборка $N = 5\,000$, уровень помех 3 (рис. 8). Средние значения отклонений соответствующих выходов: 0,658; 0,85; 0,599. Максимальные значения отклонений соответствующих выходов: 2,739; 3,143; 2,637.

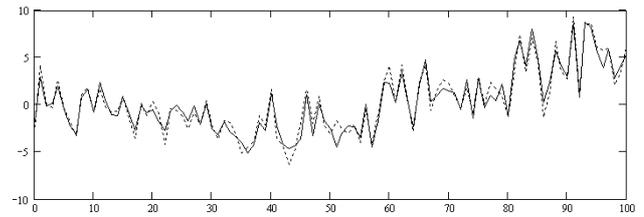


Рис. 8

6. Выборка $N = 10\,000$, уровень помех 7 (рис. 9). Средние значения отклонений соответствующих выходов: 0,972; 1,257; 0,776. Максимальные значения отклонений соответствующих выходов: 7,554; 13,23; 5,827.

Дальнейшее увеличение объемов выборки неинформативно, поскольку в реальной ситуации при необходимости моделирования организационных процессов даже

выборка размерностью в 10 000 значений относится уже к области фантастики.

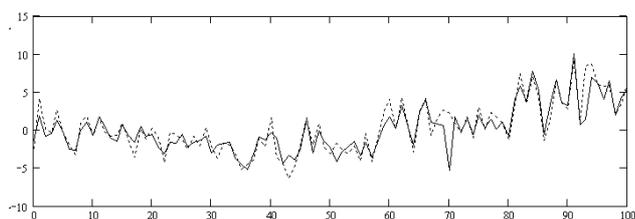


Рис. 9

Библиографический список

1. Медведев, А. В. Анализ данных в задаче идентификации / А. В. Медведев // Компьютерный анализ данных моделирования. Т. 2. Минск: Изд-во БГУ, 1995. С. 201–206.
2. Медведев, А. В. О моделировании организационных процессов / А. В. Медведев // Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева: сб. науч. тр. / САА. Вып. 1. Красноярск, 2000. С. 173–191.

Е. А. Zajtseva

NUMERICAL INVESTIGATIONS OF NON-PARAMETRIC DECISION MAKING ALGORITHMS

The problem of models construction of discrete-continuous organization processes with tubular structure is discussed in the paper. The short characteristic of problem stating in case of non-parametric indetermination is presented. The results of non-parametric decision making algorithms investigations by statistical simulation method are given.

Ю. В. Захаров, К. Г. Охоткин, В. В. Исакова, А. Д. Скоробогатов

ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОГО ИЗГИБА СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведены точные решения задачи нелинейного изгиба тонкого стержня под действием сосредоточенной следящей нагрузки. Исследованы симметричные формы прогиба двухзвеньевого стержневой конструкции под действием поперечной сосредоточенной нагрузки. Получены точные аналитические выражения в виде эллиптических функций и интегралов Якоби для формы профиля двухзвеньевого стержневой конструкции.

В настоящее время актуальными являются исследования, связанные с изучением сложных быстропротекающих процессов и структур с нелинейными свойствами. Такие задачи крайне важны как в теоретическом, так и в практическом отношении, однако точные их решения получить весьма сложно. Подобные задачи очень часто решаются приближенными или численными методами, и только немногие из них удалось решить аналитически. Задачи разработки устройств микромеханики требуют поиска точных формул для форм изгиба, стрел прогибов и частот собственных колебаний стержневых конструкций при различных видах закрепления и способах приложения нагрузки.

Исследование устойчивости гибких стержней под воздействием следящей нагрузки и составных стержневых конструкций проводилось в работах [1...3]. Однако анализ устойчивости производился, исходя из геометрически линейных уравнений равновесия и движения стержня. При этом, как правило, применялся динамический критерий устойчивости.

Недавно в работах [4; 5] была развита геометрически нелинейная теория изгиба тонких стержней. В этих работах применялся статический критерий устойчивости стержней, основанный на уравнении равновесия типа нелинейного маятника. Были найдены точные аналитические решения и систематизированы формы изгиба стержня при различных нагрузках постоянного направления и способах закрепления концов стержня. Решения были выражены через эллиптические интегралы и функции Якоби, зависящие от одного внешнего параметра – модуля эллиптических функций, определяемого граничными условиями и внешней действующей силой, в отличие от работ [6; 7], где решения зависели от трех параметров. Решения, подобные результатам работ [4; 5], приведены также в статье [8], где рассмотрена возможность второй потери устойчивости стержнем.

Данная работа посвящена точному аналитическому решению двух задач о нелинейном изгибе: тонкого упругого стержня при нагружении следящей силой и двухзвеньевого стержневой конструкции под действием поперечной силы.

Общее решение нелинейной задачи об изгибе стержня. Рассмотрим тонкий нерастяжимый стержень длиной L с изгибной жесткостью EI . Выберем декартову систему координат XOY так, чтобы изначально прямой стержень был расположен вдоль оси OX , закреплен на левом конце, находящемся в начале координат, и свободен либо закреплен на правом конце. Стержень сжимается силой P , сосредоточенной на правом конце стержня и направле-

ние действия которой образует некоторый угол с осью OX . Обозначим через l длину вдоль линии стержня, через $\theta(l)$ – угол между касательной в текущей точке к линии стержня и осью OX , через P_x, P_y – декартовы компоненты силы P (рис. 1).

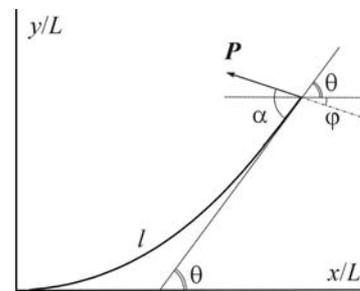


Рис. 1. Система координат

Приведем краткое общее решение этой задачи, следуя работе [5]. Обозначим через φ угол между направлением действия силы и осью OX .

Нелинейное уравнение равновесия стержня имеет вид

$$EI \frac{d^2\theta}{dl^2} - P_x \sin \theta + P_y \cos \theta = 0. \quad (1)$$

Введем следующие обозначения: P – модуль сосредоточенной силы; $t = l/L$ – безразмерная длина, изменяющаяся от 0 до 1; $q^2 = PL^2/EI$ – собственное число. Приведем решение уравнения (1):

$$\theta(t) = -\varphi + 2\arcsin [k \operatorname{sn}(qt + F_1, k)],$$

$$d\theta(t)/dt = 2kq \operatorname{cn}(qt + F_1, k), \quad (2)$$

где $\operatorname{sn}, \operatorname{cn}$ – эллиптические синус и косинус Якоби. Модуль эллиптических функций k и параметр F_1 выполняют роль констант интегрирования, и их связь с силой P и углом φ определяется по граничным условиям в каждом случае изгиба стержня.

Введем обозначение для аргумента эллиптических функций

$$u = qt + F_1. \quad (3)$$

Интегрируя соотношения $dx/dl = \cos \theta$, $dy/dl = \sin \theta$, найдем координаты произвольной точки стержня:

$$\begin{aligned} x/L &= X_0 \cos \varphi + Y_0 \sin \varphi, \\ y/L &= Y_0 \cos \varphi - X_0 \sin \varphi, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} X_0 &= -t + \frac{2}{q} [E(\operatorname{am} u, k) - E(\operatorname{am} F_1, k)]; \\ Y_0 &= \frac{2k}{q} [\operatorname{cn}(F_1, k) - \operatorname{cn}(u, k)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $E(am u)$ – неполный эллиптический интеграл второго рода от эллиптической амплитуды Якоби. Выражения (4), (5) задают форму профиля изогнутого стержня в параметрическом виде с параметром t – приведенной длиной стержня.

Представим, следуя методу работы [5], точное аналитическое решение для двух упругих систем.

Изгиб стержня с заземленным и свободным концами под действием следящей силы при произвольном угле слежения. Рассмотрим стержень, жестко заземленный на одном конце и свободный на другом, находящийся под действием следящей силы, с заданным углом слежения. Граничные условия рассматриваемого закрепления концов стержня имеют вид

$$\theta(0) = 0, d\theta(L) / dl = 0. \quad (6)$$

Введем угол слежения α – угол между линией действия силы и касательной к линии изгиба стержня в конце стержня (см. рис. 1). При нагружении следящей силой угол φ между направлением действия силы и осью OX может изменяться в процессе нагружения.

Исходя из определения следящей силы, запишем дополнительное условие постоянства угла α на конце стержня:

$$\theta(1) = \alpha - \varphi. \quad (7)$$

Будем считать величины P и α параметрами состояния, заданными условиями задачи.

С учетом первого условия в (6) и используя решение (2) уравнения (1), получим $\operatorname{sn} F_1 = \sin(\varphi/2)/k$, отсюда

$$F_1 = F[\arcsin(\sin(\varphi/2)/k), k], \quad (8)$$

где $F(\varphi, k)$ – неполный эллиптический интеграл первого рода.

По второму условию в (6) имеем $\operatorname{cn}(q + F_1) = 0$ и

$$q = (2n - 1)K(k) - F_1, n = 1, 2, 3, \dots, \quad (9)$$

где $K(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода.

Используя условие для следящей силы (7), по (2) и (9) получим, что $\sin(\beta/2) = k \operatorname{sn}(K(k), k)$, следовательно

$$k = \sin(\alpha/2). \quad (10)$$

Выражение (10) определяет значение модуля эллиптических функций и интегралов k по известному значению угла α . В задаче со следящей силой нагрузка при заданном угле α определяет угол φ , в отличие от задачи изгиба стержня при нагружении силой постоянного направления [5], в которой нагрузка при заданном угле φ определяет модуль k . По выражениям (8)...(10) следует спектр собственных значений $q_n(k)$, который в свою очередь определяет критические нагрузки

$$P/P_c = (2/\pi)^2 \{ (2n - 1)K(\sin(\alpha/2)) - F[\arcsin(\sin(\varphi/2)/\sin(\alpha/2)), \sin(\alpha/2)] \}^2, \quad (11)$$

где n – номер моды решения. Выражение (11) показывает связь между величиной внешней следящей силы P и φ – углом наклона силы к оси OX для каждой моды n при заданном угле слежения α (рис. 2).

При изменении величины внешней силы для каждой моды, исходя из (10), параметр φ изменяется в пределах

$$-\alpha \leq \varphi \leq \alpha. \quad (12)$$

При $\varphi = \pm\alpha$ имеем пороговые значения внешней силы:

$$\frac{P_n}{P_c} = (n-1)^2 \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 K^2 \left(\sin \frac{\alpha}{2} \right), n = 1, 2, \dots, \quad (13)$$

при превышении которых происходит смена моды решения. Первая мода ($n = 1$) начинается с нулевого порога ($P_1 = 0$).

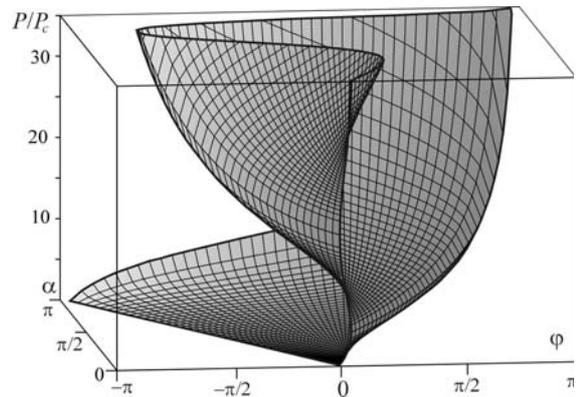


Рис. 2. Спектр собственных значений нелинейного уравнения равновесия при действии следящей силы

На первой моде внешняя сила P/P_c плавно и непрерывно увеличивается от нуля до следующего, второго порогового значения P_2 , а параметр φ – угол наклона силы к оси OX – при этом плавно изменяется от α до $-\alpha$. Вторая мода решения появляется при превышении нагрузкой P порогового значения P_2 , при этом угол $\varphi = -\alpha$. На второй моде ($n = 2$) внешняя сила P/P_c увеличивается дальше от P_2 до P_3 , а параметр φ при этом изменяется в обратном направлении от $-\alpha$ до α и т. д.

Таким образом, основной особенностью решения задачи изгиба стержня при следящем нагружении является плавный переход между модами (смена мод) решения при увеличении внешней нагрузки. Можно говорить о мягкой потере устойчивости при изгибе. Это является существенным отличием от задачи с нагружением стержня силой постоянного направления [5], где нет плавного перехода между модами и реализуется только одна из возможных мод решения. Реализация старших мод возможна при условии импульсного, скачкообразного нагружения. Поэтому здесь можно говорить о жесткой потере устойчивости.

Координаты точек стержня определяются выражениями (4), (5) при подстановке значений q, F_1, k из (8)...(10). Тогда в общем случае заданных произвольного угла слежения α и величины силы P получим выражения для формы прогиба стержня:

$$\frac{x}{L} = \left[-t + 2 \frac{(E(am u) - E_1)}{pK(k) - F_1} \right] \cos \varphi + 2k \frac{(\operatorname{cn} F_1 - \operatorname{cn} u)}{pK(k) - F_1} \sin \varphi, \quad (14)$$

$$\frac{y}{L} = 2k \frac{(\operatorname{cn} F_1 - \operatorname{cn} u)}{pK(k) - F_1} \cos \varphi - \left[-t + 2 \frac{(E(am u) - E_1)}{pK(k) - F_1} \right] \sin \varphi,$$

где $F_1 = F[\arcsin(\sin(\varphi/2)/k), k]$; $E_1 = E[\arcsin(\sin(\varphi/2)/k), k]$; $u = (pK(k) - F_1)t + F_1$; $p = 2n - 1$; $k = \sin(\alpha/2)$.

Величина силы P будет связана с параметром φ выражением (11).

Таким образом, каждому значению внешней силы P и номеру моды n при заданном угле слежения α соответствует своя форма прогиба стержня, задаваемая одним параметром – углом φ , который в соотношении (11) определяется по известной силе P (рис. 3).

При нагружении следящей силой переход от одной моды к другой происходит плавно, в отличие от нагруже-

ния силой постоянного направления. В развернутом виде решение данной задачи приведено в статье [11].

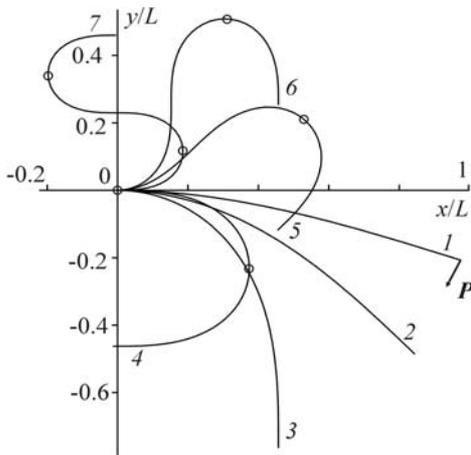


Рис. 3. Формы прогиба стержня при различных значениях поперечной следящей силы: первая мода ($n = 1$): кривые 1 – $\varphi = 2\pi / 5$; 2 – $\varphi = \pi / 4$; 3 – $\varphi = 0$; 4 – $\varphi = -\pi / 2$. Вторая мода ($n = 2$): кривые 5 – $\varphi = -\pi / 4$; 6 – $\varphi = 0$; 7 – $\varphi = \pi / 2$; кружками отмечены точки сжатия

Изгиб двухзвеньевой стержневой конструкции при поперечной нагрузке. Рассмотрим двухзвеньевую стержневую конструкцию, состоящую из двух шарнирно соединенных тонких гибких стержней, под действием поперечной сосредоточенной нагрузки (рис. 4). Введем обозначения: α – начальный угол наклона стержня к оси OY , P – поперечная сосредоточенная нагрузка.

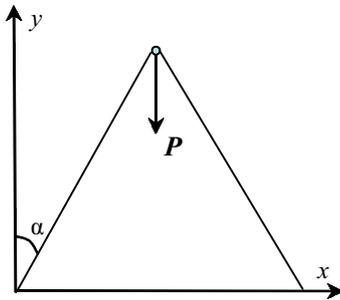


Рис. 4. Схема двухзвеньевой стержневой конструкции

Стержни в конструкции имеют одинаковые геометрические и физические параметры. Рассмотрим симметричные формы прогиба двухзвеньевой стержневой конструкции. В данной задаче пренебрегаем деформациями растяжения, сжатия и будем рассматривать только деформации чистого изгиба.

Запишем нелинейные уравнения равновесия для каждого стержня в конструкции

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} + q^2 \sin \gamma = 0, \quad (15)$$

где $\gamma(t) = \theta(t) + \varphi$. В случае поперечной нагрузки угол $\varphi = \pi / 2$.

Точное решение уравнения (15) записано в эллиптических функциях и интегралах Якоби

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= 2 \arcsin[k \operatorname{sn}(qt + F_2, k)], \\ \gamma'(t) &= 2kq \operatorname{cn}(qt + F_2, k). \end{aligned} \quad (16)$$

Рассмотрим три случая закрепления двухзвеньевой стержневой конструкции в основании: шарнирное, жесткое и упругое.

Запишем граничные условия к уравнению (15) для шарнирного закрепления в основании конструкции. В этом случае изгибающий момент обращается в ноль:

$$d\gamma(0) / dt = 0. \quad (17)$$

Условие соединения частей двухзвеньевой стержневой конструкции

$$x(1) = \sin \alpha. \quad (18)$$

Применяя первое условие (17) к решению (16), получим, что $\operatorname{sn}(F_2, k) = 0$, следовательно

$$F_2 = (2n - 1) K(k), n = 1, 2, 3, \dots, \quad (19)$$

где $K(k)$ – полный эллиптический интеграл первого рода; n – номер моды решения.

Применяя второе условие (18) к выражениям (4), (5), получим трансцендентное уравнение для определения зависимости собственного числа q от модуля эллиптических функций k и угла α :

$$2k \operatorname{cn}(q + (2n - 1)K(k), k) + q \sin \alpha = 0. \quad (20)$$

Трансцендентное уравнение (20) не имеет точных аналитических решений, поэтому для нахождения спектра собственных значений $q_n(k)$, который в свою очередь определяет систему порогов внешней нагрузки, будем использовать численные методы. Область изменения модуля k при $q = 0$ $\sin(\alpha / 2) \leq k \leq \cos(\alpha / 2)$. В соответствии с выражением (20) построим зависимость приведенной нагрузки P / P_c от модуля k и начального угла наклона α , где $P_c = (\pi / 2)^2 EI / L^2$ – Эйлера критическая сила (рис. 5).

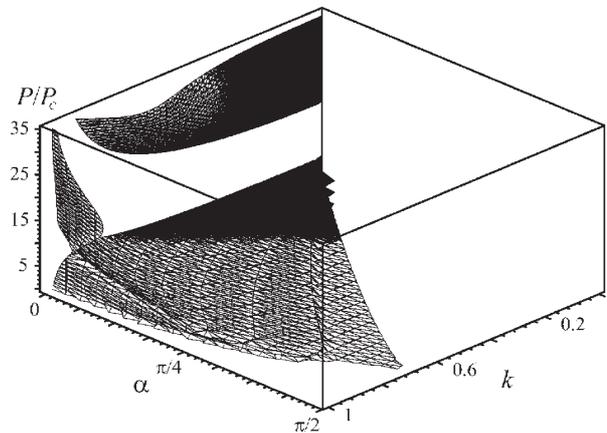


Рис. 5. Спектр собственных значений нелинейного уравнения равновесия для двухзвеньевой стержневой конструкции при шарнирном закреплении

Там показаны две отдельные области, в которых одному значению модуля k соответствуют разные значения нагрузки P / P_c . Нижняя поверхность соответствует первому собственному числу – первой статической моде нагружения, верхняя поверхность – второму собственному числу – динамической моде нагружения.

Статический порог нагрузки для однородного стержня при $n = 1$ равен Эйлеровой силе. Пороги при $n > 1$ были названы М. А. Лаврентьевым и А. Ю. Ишлинским динамическими порогами потери устойчивости, которые

могут быть достигнуты при ударном приложении нагрузки, когда время нарастания импульса меньше времени релаксации системы [10]. В данной работе представлены только результаты исследования для статической моды нагружения.

Форма изогнутой линии стержня в параметрическом виде определяется выражениями (4), (5) и (19), (20):

$$\begin{aligned} \frac{x}{L} &= -\frac{2k}{q} \operatorname{cn}(u, k), \\ \frac{y}{L} &= -t + \frac{2}{q} [E(\operatorname{am} u, k) - E(k)], \end{aligned} \quad (21)$$

где аргумент функций $u = qt + (2n - 1)K(k)$.

Рассмотрим второй случай закрепления двухзвеньевой стержневой конструкции – *закрепление на жестком основании* под действием поперечной сосредоточенной нагрузки.

Жесткое закрепление стержня в основании конструкции требует выполнения условия

$$\gamma(0) = \theta(0) + \pi/2 = \pi/2 - \alpha + \pi/2 = \pi - \alpha. \quad (22)$$

Второе граничное условие – условие соединения частей двухзвеньевой стержневой конструкции (18).

Применяя первое граничное условие (22) к решению (16), получим

$$\begin{aligned} F_2 &= nF \left(\arcsin \left(\frac{1}{k} \cos \frac{\alpha}{2} \right), k \right), \\ n &= 1, 2, 3, \dots, \operatorname{cn}(F_2, k) = \sqrt{1 - \frac{\cos^2(\alpha/2)}{k^2}}. \end{aligned} \quad (23)$$

Модуль k изменяется в пределах, определяемых начальным углом наклона α : $\cos(\alpha/2) < k < 1$.

Применяя второе граничное условие (18) к выражениям (4), (5), получим трансцендентное уравнение для нахождения спектра собственных значений $q_n(k)$, определяющего систему порогов внешней нагрузки:

$$\operatorname{cn}(F_2, k) - \operatorname{cn}(q + F_2, k) - \frac{q \sin \alpha}{2k} = 0. \quad (24)$$

Форма изогнутой линии стержня в параметрическом виде определяется выражениями (4), (5) и (23), (24):

$$\begin{aligned} \frac{x}{L} &= \frac{2k}{q} [\operatorname{cn}(F_2, k) - \operatorname{cn}(u, k)], \\ \frac{y}{L} &= -t + \frac{2}{q} [E(\operatorname{am} u, k) - E_2], \end{aligned} \quad (25)$$

где $u = qt + F_2$ – аргумент функций; $E_2 = E \left(\arcsin \left(\frac{1}{k} \cos \frac{\alpha}{2} \right), k \right)$.

На основании точных аналитических решений (21) и (25) построим последовательные формы прогиба изогнутой двухзвеньевой стержневой конструкции под действием поперечной нагрузки при шарнирном и жестком закреплении в основании для угла $\alpha = \pi/4$ (рис. 6).

Таким образом, каждому значению внешней силы P будет соответствовать своя форма прогиба двухзвеньевой стержневой конструкции, задаваемая одним параметром – модулем эллиптических функций k , который определяется внешней действующей нагрузкой P .

Представим зависимости прогиба двухзвеньевой стержневой конструкции в точке приложения силы от приведенной нагрузки P/P_c для угла наклона $\alpha = \pi/4$ для двух случаев закрепления конструкции в основании: шарнирного и жесткого (рис. 7).

Третий случай закрепление двухзвеньевой стержневой конструкции – *закрепление на упругом основании* под действием поперечной сосредоточенной нагрузки.

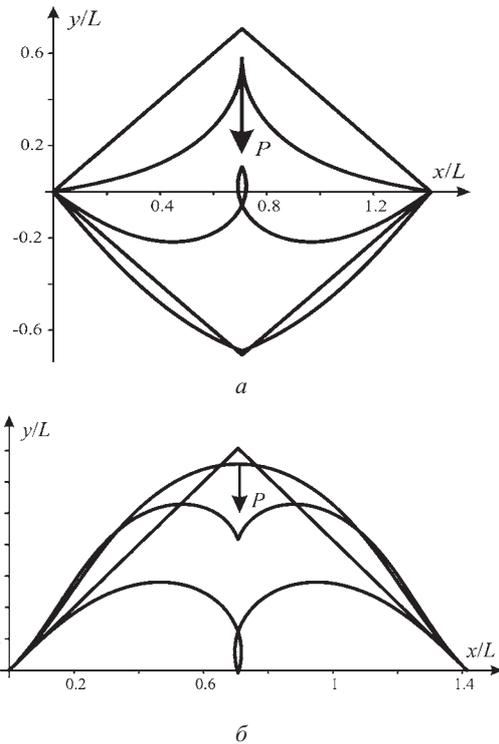


Рис. 6. Последовательные формы прогиба двухзвеньевой стержневой конструкции: а – при шарнирном закреплении; б – на жестком основании. Соответствующие нагрузки: $P_1 = 2,61P_c$, $P_2 = 4,75P_c$, $P_3 = 2,77P_c$

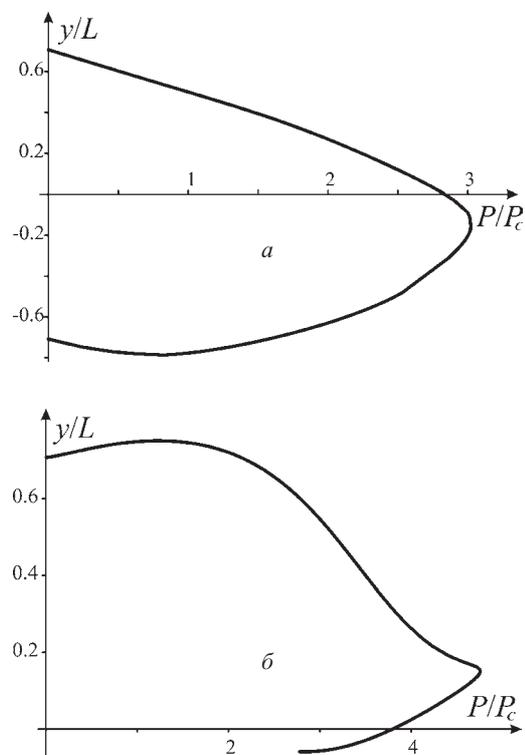


Рис. 7. График зависимости прогиба конструкции: а – при шарнирном закреплении; б – на жестком основании от приведенной нагрузки P/P_c

Упругое закрепление стержня в основании конструкции требует, чтобы

$$\gamma(0) - h\gamma'(0) = \pi - \alpha, \quad (26)$$

где h^{-1} – жесткость закрепления. Второе граничное условие – условие соединения частей двухзвеньевого стержневой конструкции (18).

После применения граничных условий получаем систему двух трансцендентных уравнений для определения собственного числа q и параметра F_2 :

$$\begin{cases} \arcsin[k \operatorname{sn}(F_2, k)] - hkq \operatorname{cn}(F_2, k) = (\pi - \alpha) / 2, \\ \operatorname{cn}(F_2, k) - \operatorname{cn}(q + F_2, k) = q \sin \alpha / 2k. \end{cases} \quad (27)$$

Решая систему (27) с помощью численных методов, можно найти зависимость собственного числа q от модуля k .

Форма изогнутой линии стержня в параметрическом виде определяется выражениями (4), (5) и (27):

$$\begin{aligned} \frac{x}{L} &= \frac{2k}{q} [\operatorname{cn}(F_2, k) - \operatorname{cn}(u, k)], \\ \frac{y}{L} &= -t + \frac{2}{q} [E(\operatorname{am} u, k) - E(\operatorname{am} F_2, k)], \end{aligned} \quad (28)$$

где $u = qt + F_2$ – аргумент функций. Последовательные формы прогиба изогнутой двухзвеньевого стержневой конструкции на упругом основании под действием поперечной нагрузки для угла $\alpha = \pi/4$, исходя из точных аналитических решений (28), имеют следующий вид (рис. 8).

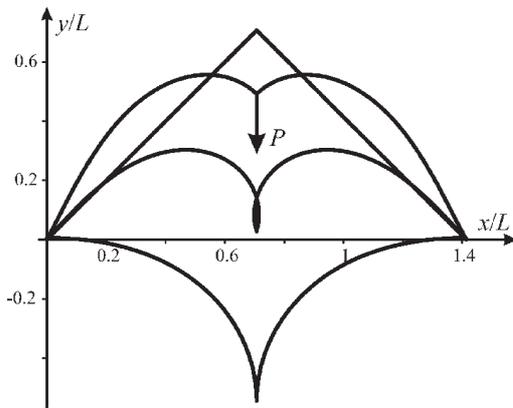


Рис. 8. Последовательные формы прогиба двухзвеньевого стержневой конструкции на упругом основании ($h = 1$). Соответствующие нагрузки

$$P_1 = 2,90P_c, P_2 = 2,82P_c, P_3 = 0,74P_c$$

В соответствии с выражениями (20), (24) и (27) построим зависимости приведенной нагрузки P/P_c от модуля эллиптических функций k для начального угла наклона α , равного $\pi/4$ для трех случаев закрепления двухзвеньевого стержневой конструкции (рис. 9).

Граничное условие упругого закрепления (26) имеет два предельных случая: при $h \rightarrow 0$ условие (26) переходит в условие (22) для жесткого закрепления, а при $h \rightarrow \infty$ условие (26) переходит в условие (17) для шарнирного закрепления.

Таким образом, при последовательном применении методики, представленной в работе [5], получены точные решения задачи о геометрически нелинейном изгибе тонкого стержня под действием следящей силы. Эти решения имеют удобный для алгоритмических вычислений вид и

позволяют подробно анализировать формы решений и пороги потери устойчивости для различных мод изгиба стержня. Этот анализ позволил показать существенную разницу между жесткой потерей устойчивости при нагружении силой постоянного направления и мягкой потерей устойчивости при нагружении следящей силой. Полученные результаты можно использовать в качестве тестовых примеров при разработке численных методов решения нелинейных уравнений изгиба стержней [9].

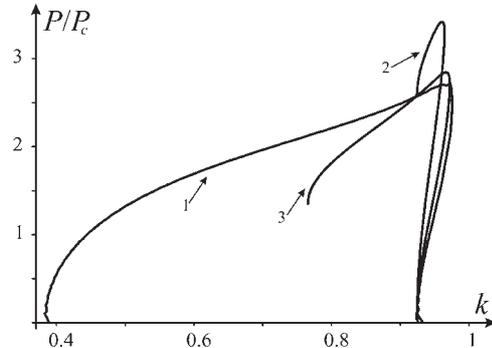


Рис. 9. Графики зависимости приведенной нагрузки P/P_c от модуля k : кривая 1 – конструкция при шарнирном закреплении ($h \rightarrow \infty$); кривая 2 – конструкция на жестком основании ($h = 0$); кривая 3 – конструкция на упругом основании ($h = 1$)

В работе исследованы симметричные формы прогиба двухзвеньевого стержневой конструкции при шарнирном, жестком и упругом закреплении в основании в случае геометрической нелинейности системы. Найдены формы прогиба двухзвеньевого стержневой конструкции и области значений внешней действующей нагрузки. При решении поставленной задачи была использована система геометрически нелинейных уравнений равновесия тонких гибких стержней типа уравнения нелинейного маятника. Точные аналитические решения для формы прогиба изогнутой двухзвеньевого стержневой конструкции записаны с помощью аналитических выражений в едином параметрическом виде, с использованием эллиптических функции и интегралов Якоби. Эти выражения зависят от одного параметра – модуля эллиптических функций, определяемого внешней действующей нагрузкой. Такое представление решения позволяет находить формы изогнутой стержневой конструкции при любом числе точек перегиба. Полученные результаты можно применять для анализа ферм и рам, применяемых в строительных и авиационных конструкциях и системах, при различных условиях опирания.

Работа поддержана грантом РФФИ 02-01-01017.

Библиографический список

1. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. М.: Наука. 1967.
2. Феодосьев, В. И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов / В. И. Феодосьев. М.: Наука, 1973.
3. Тимошенко, С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек / С. П. Тимошенко. М.: Наука, 1971.
4. Захаров, Ю. В. Динамическая потеря устойчивости в нелинейной задаче о консоли / Ю. В. Захаров, А. А. За-

- харенко // Вычислительные технологии. 1999. Т. 4, № 1. С. 48–54.
5. Захаров, Ю. В. Нелинейный изгиб тонких упругих стержней / Ю. В. Захаров, К. Г. Охоткин // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 5. С. 124–131.
6. Попов, Е. П. Нелинейные задачи статики тонких стержней / Е. П. Попов. Л.; М.: ОГИЗ, 1948.
7. Попов, Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней / Е. П. Попов. М.: Наука, 1986.
8. Левяков, С. В. Формы равновесия и вторичная потеря устойчивости прямого стержня, нагруженного продольной силой / С. В. Левяков // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 2. С. 153–159.
9. Шкутин, Л. И. Численный анализ разветвленных форм изгиба стержней / Л. И. Шкутин // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 2. С. 141–147.
10. Лаврентьев, М. А. Динамические формы потери устойчивости упругих систем / М. А. Лаврентьев, А. Ю. Ишлинский // ДАН СССР. 1949. Т. 64, № 6. С. 779–782.
11. Захаров, Ю. В. Изгиб стержней под действием следящей нагрузки / Ю. В. Захаров, К. Г. Охоткин, А. Д. Skorobogatov // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 5. С. 167–175.

Yu. V. Zakharov, K. G. Okhotkin, V. V. Isakova, A. D. Skorobogatov

PROBLEMS OF THE NONLINEAR BENDING OF ROD DESIGNS

Exact solutions of the problem of nonlinear bending of a thin bar under a point follower load are given. Symmetric forms of a deflection of a compound rod design under action of the cross concentrated loading are investigated. The solutions are written in unified parametric form and expressed in terms of Jacobi elliptic functions.

И. В. Ковалев, А. А. Ступина, Е. С. Гаврилов

ТРАНЗАКЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ

Особенностью тестирования сложных программ информационно-управляющих систем является необходимость достаточно полной проверки их качества при ограниченных ресурсах и длительности испытаний. Это определяет целесообразность использования транзакционной модели надежности технологий обработки данных при многоэтапной разработке информационно-управляющих систем.

Современные исследования надежности систем управления и обработки информации показали, что качество их работы напрямую зависит от надежности и безотказности программного обеспечения (ПО) [1]. За прошедшие десятилетия было создано множество методов и моделей исследования надежности программного обеспечения, однако единого подхода к решению этой проблемы еще не было предложено. Причиной этому является уникальность каждой программной системы. Тем не менее при разработке ответственных проектов их создатели стараются в той или иной степени получить оценку надежности ПО на основе результатов конечных испытаний. Современные программные системы используют при работе колоссальный объем данных, проходящих через стандартные модули и функции. Поэтому выявить все связи и пути обработки информации, даже для достаточно несложной программы, практически невозможно. Исходя из этого детализация элементов расчета надежности, условно называемых программными модулями, должна ограничиваться законченными программными образованиями, которые, взаимодействуя между собой, составляют более сложное объединение, надежность которого нас и интересует.

Основными подходами при создании отказоустойчивых систем управления и обработки информации являются применение алгоритмов и моделей оценки надежности программных средств на каждом шаге жизненного цикла и использование мультиверсионного программного обеспечения [2]. Надежность ПО определяется как вероятность функционирования без ошибок за определенный период времени в определенной операционной системе. Для большинства разработчиков надежностью является корректность ПО, т. е. количество ошибок, которое надо исправить во время теста. Существует и другое определение надежности, понимаемой как операционная (транзакционная) надежность [3]. Операционная надежность – это способность системы или компонента выполнять требуемые функции при определенных условиях в рамках транзакции. Она широко используется в системах обработки и хранения информации в базах данных.

Модель оценки транзакционной надежности объектно-ориентированного программного обеспечения. Транзакционная надежность по своему смыслу отличается от классического понимания надежности. Она может применяться для оценки надежности программного обеспечения обработки и хранения данных, где логической единицей работы является транзакция. Транзакционная надежность зависит не только от надежности компонентов,

но и от конкретной проблемной области, для которой было разработано программное обеспечение, а формально – от набора операционных профилей компонентов.

Для вычисления общей надежности R_{tr} необходимо составить полный перечень всех транзакций и вычислить надежность каждой транзакции с использованием операционных профилей. В данной работе будет использовано следующее определение: транзакция – это последовательность действий, которая считается завершенной успешно, если ни на одном шаге не было ни одного сбоя. Транзакцией может служить как единичная транзакция информационных систем, так и некоторая логически завершенная, независимая последовательность действий пользователя в системе. Для корректности расчетов, как правило, выбирается один тип транзакций.

Введем следующие обозначения:

- m – общее количество классов;
- n – общее количество транзакций;
- K_i – класс, $i = 1, \dots, m$;
- O_i – операционный профиль (множество входных диапазонов) i -го класса, $i = 1, \dots, m$;
- F_i – вектор, отображающий вероятности сбоя i -го класса для каждого входного диапазона, $i = 1, \dots, m$;
- f_{il} – l -й элемент вектора F_i , l – размерность вектора F_i ;
- T_j – транзакция, $j = 1, \dots, n$;
- D_j – множество классов, принадлежащих j -й транзакции, $i = 1, \dots, n$;
- H_{ij} – вектор вероятностей использования диапазона значений i -го класса в j -й транзакции;
- h_{ijk} – k -й элемент вектора H_{ij} ;
- W_{ij} – вес (надежность) i -го класса j -й транзакции;
- PU_j – вероятность использования j -й транзакции, сумма всех PU равна 1;
- R_{ij} – надежность j -й транзакции;
- R_{tr} – транзакционная надежность всей системы.

Вес (надежность) i -го класса j -й транзакции определяется по формуле

$$W_{ij} = \sum_{k=1}^l h_{ijk} (1 - f_{ik}). \quad (1)$$

Надежность транзакции можно вычислить как

$$R_{tj} = \prod_{k=1}^n W_{jk}. \quad (2)$$

После вычисления надежностей всех транзакций находится общая транзакционная надежность системы:

$$R_{tr} = \sum_{j=1}^m PU_j \cdot R_{tj}. \quad (3)$$

Представим алгоритм оценки и анализа транзакционной надежности программного обеспечения (см. рису-

нок) и проиллюстрируем основные этапы расчета транзакционной надежности на примере.

Имеется 3 класса с тремя диапазонами входных значений и известными вероятностями сбоя в каждом диапазоне:

$$K_1: f_1 = \{0,01; 0; 0,001\};$$

$$K_2: f_2 = \{0; 0; 0,05\};$$

$$K_3: f_3 = \{0; 0,001; 0,001\}.$$

Имеется 2 транзакции с известными вероятностями использования диапазонов классов и вероятностями использования транзакций:

– транзакция T_1 :

$$PU_1 = 0,7;$$

$$H_{11} = \{0,3; 0,1; 0,6\};$$

$$H_{12} = \{0,4; 0,4; 0,2\};$$

$$H_{13} = \{0,8; 0,1; 0,1\}.$$

– транзакция T_2 :

$$PU_2 = 0,3;$$

$$H_{21} = \{0,2; 0,2; 0,6\};$$

$$H_{22} = \{0,3; 0,7; 0\};$$

$$H_{23} = \{0; 0,9; 0,1\}.$$

Вычислим веса W_{ij} :

$$W_{11} = 0,3(1-0,01) + 0,1(1-0) + 0,6(1-0,001) = 0,9964;$$

$$W_{12} = 0,4(1-0) + 0,4(1-0) + 0,2(1-0,05) = 0,9;$$

$$W_{13} = 0,8(1-0) + 0,1(1-0,0001) + 0,1(1-0,0001) = 0,9998.$$

Аналогично вычислим:

$$W_{21} = 0,9974;$$

$$W_{22} = 0;$$

$$W_{23} = 0,9990.$$

Получим:

$$R_{t1} = W_{11} \cdot W_{12} \cdot W_{13} = 0,8966;$$

$$R_{t2} = W_{21} \cdot W_{22} \cdot W_{23} = 0,9964.$$

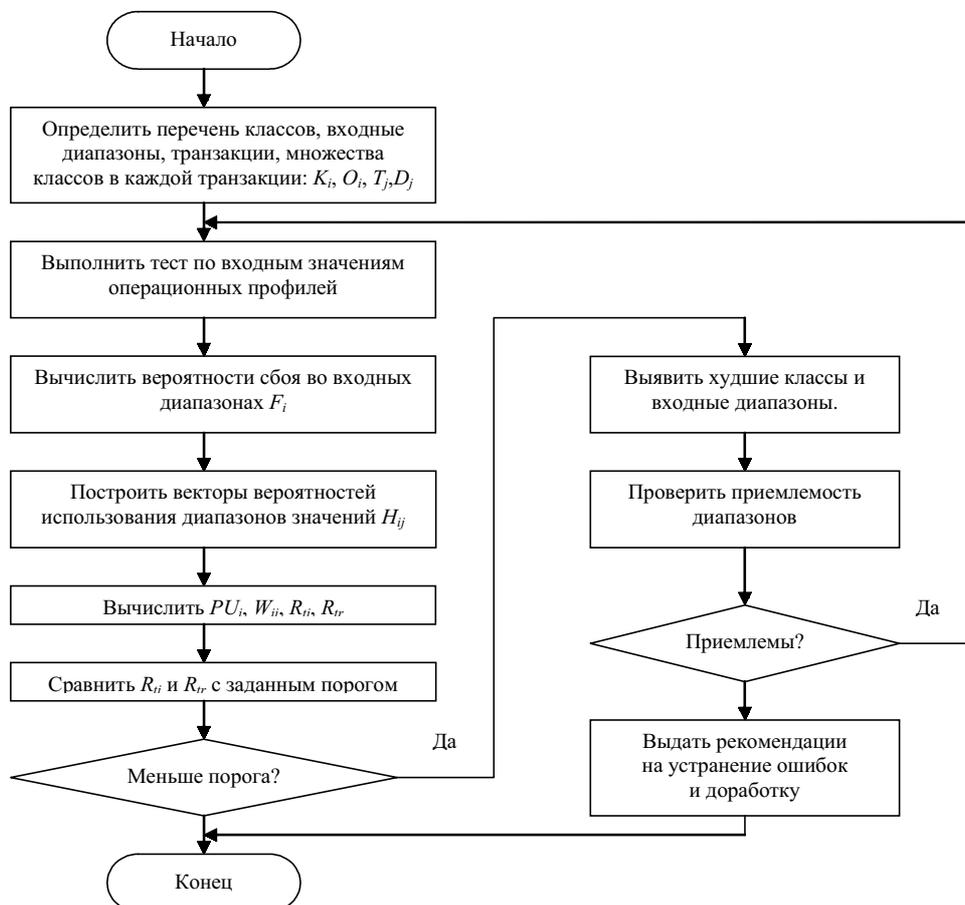
В итоге имеем:

$$R_{tr} = 0,7 \cdot 0,8966 + 0,3 \cdot 0,9964 = 0,9265.$$

Вычислить транзакционную надежность системы можно только после составления операционных профилей и весовых векторов всех классов, т. е. только после полного тестирования готовой системы (см. рисунок). Основное преимущество этой модели заключается в том, что все ее параметры можно получить из данных после теста системы, что дает возможность построить оценки параметров надежности. Такая модель является полезной для оценки информационных систем обработки и хранения данных, например для современных ERP-систем.

Пример расчета транзакционной надежности и анализ полученных результатов. В качестве примера рассмотрим проект создания модуля «Управление автотранспортом» в системе Microsoft Business Solutions-Ахapta. Эта система обладает следующими функциями, которые позволяют эффективно реализовать рассмотренный в данной работе подход:

- реализация на объектно-ориентированном языке X++, аналогичном по синтаксису языкам C++ и Java;
- открытый код, доступный для модификаций;
- встроенные средства визуального программирования;
- около 2 000 классов, реализующих бизнес-логику системы;
- встроенный профайлер кода с детализацией времени выполнения до строки исходного кода;



Алгоритм расчета транзакционной надежности

- встроенные средства мониторинга и трассировки ошибок;
- возможность организации распределенных вычислений.

Проведем расчет транзакционной надежности.

1. *Фаза создания архитектуры.* Для объектно-ориентированного подхода архитектура программного обеспечения – это совокупность иерархий классов. Каждый класс – совокупность свойств (переменных) и методов (функций) объекта. Процесс – последовательный переход от метода одного класса к методу другого класса.

На данной фазе была построена архитектура будущего программного обеспечения. По предварительной оценке для реализации бизнес-логики модуля необходимо создание 18 классов (компонентов), 5 из которых являются классами верхнего уровня, или суперклассами. Общее количество методов во всех классах – 362.

2. *Фазы кодирования и тестирования компонентов.* Необходимо определить начальную плотность ошибок в коде. Известна следующая априорная информация:

- коэффициент командного программирования F_{pr} (определяется как средний и равен 1);
- коэффициент опытности F_m (определяется как «Уровень 3» и равен 0,4);
- границы коэффициента C – константы, определяющей количество ошибок (лежат в диапазоне от 6 до 20);
- коэффициент структурирования F_s (принимается равным 1);
- коэффициент фазы тестирования F_{ph} (используется тестирование модуля и равен 4).

Количество тысяч строк кода (KLOC-оценка) в каждом классе следующее: K1 – 1,1; K2 – 3,2; K3 – 2,0; K4 – 0,6; K5 – 0,3; K6 – 0,9; K7 – 1,0; K8 – 1,2; K9 – 2,2; K10 – 1,4; K11 – 0,4; K12 – 0,5; K13 – 1,0; K14 – 1,2; K15 – 1,7; K16 – 0,7; K17 – 0,6; K18 – 0,9. В результате получаем расчетные данные, представленные в табл. 1.

В табл. 1 применяются следующие обозначения: R_m – желаемый уровень надежности; β_0 – общее количество ошибок; β_1 – константа пропорциональности; N_{0max} – начальное количество ошибок в исходном коде; T_r – время тестирования, необходимое для достижения надежности R_m ; T_{rh} – время тестирования в человеко-часах (для пересчета использовался коэффициент 5).

В результате получаем, что для тестирования всех классов потребуется около 1 635 человеко-часов, что равно 68 рабочим дням для команды из трех программистов-тестировщиков. В реальном проекте на тестирование 18 классов было потрачено 1 700 человеко-часов [7].

3. *Фаза тестирования системы.* В качестве примера рассмотрим формирование двух типов в модуле «Управление автотранспортом» системы Microsoft-Ахарт. В результате тестирования было выявлено 4 транзакции, которые суммарно используют 18 классов с максимальным количеством диапазонов входных значений 4 (табл. 2).

Вероятности использования транзакций следующие:

$$PU_1 = 0,330\ 000; PU_2 = 0,250\ 000; \\ PU_3 = 0,150\ 000; PU_4 = 0,270\ 000.$$

Опишем подмножества классов, входящих в транзакции:

$$D_1 = \{1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 17, 18\}; \\ D_2 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 16, 17, 18\}; \\ D_3 = \{2, 3, 5, 7, 8, 10, 12, 15, 16, 17\}; \\ D_4 = \{6, 7, 8, 15, 16, 17, 18\}.$$

Векторы вероятностей использования диапазонов и векторы весов транзакций $T1 \dots T4$ выглядят следующим образом (табл. 3...6).

Имея все необходимые данные, рассчитаем надежность каждой транзакции по формуле (2):

$$Rt_1 = 0,999\ 436; Rt_2 = 0,999\ 855; Rt_3 = 0,999\ 662, \\ Rt_4 = 0,999\ 710.$$

В результате получаем итоговую транзакционную надежность:

$$R_r = 0,999\ 649.$$

Таблица 1

Расчет данных на фазе тестирования компонентов

Класс	L , тыс. строк	β_1	$N_{0max} = \beta_0$	R_m	T_r	T_{rh} , чел.-ч
K1	1,100 000	90,909 000	88	0,990 000	18,290 000	91,440 000
K2	3,200 000	31,250 000	256	0,990 000	19,360 000	96,780 000
K3	2,000 000	50,000 000	160	0,990 000	18,890 000	94,430 000
K4	0,600 000	166,667 000	48	0,990 000	17,680 000	88,410 000
K5	0,300 000	333,333 000	24	0,990 000	16,990 000	84,940 000
K6	0,900 000	111,111 000	72	0,990 000	18,090 000	90,440 000
K7	1,000 000	100,000 000	80	0,990 000	18,190 000	90,960 000
K8	1,200 000	83,333 000	96	0,990 000	18,370 000	91,870 000
K9	2,200 000	45,455 000	176	0,990 000	18,980 000	94,900 000
K10	1,400 000	71,429 000	112	0,990 000	18,530 000	92,640 000
K11	0,400 000	250,000 000	32	0,990 000	17,280 000	86,380 000
K12	0,500 000	200,000 000	40	0,990 000	17,500 000	87,500 000
K13	1,000 000	100,000 000	80	0,990 000	18,190 000	90,960 000
K14	1,200 000	83,333 000	96	0,990 000	18,370 000	91,870 000
K15	1,700 000	58,824 000	136	0,990 000	18,720 000	93,620 000
K16	0,700 000	142,857 000	56	0,990 000	17,840 000	89,180 000
K17	0,600 000	166,667 000	48	0,990 000	17,680 000	88,410 000
K18	0,900 000	111,111 000	72	0,990 000	18,090 000	90,440 000

Операционные профили классов

Классы	Вероятности сбоя в диапазоне			
	1	2	3	4
К1	0,000 010	0	0,000 070	0
К2	0	0	0,000 010	0,000 010
К3	0	0,000 040	0,000 550	
К4	0	0	0	0,000 050
К5	0	0	0,000 020	0
К6	0,000 340	0	0	0
К7	0	0	0,001 100	0
К8	0	0	0	0,000 090
К9	0	0,000 001	0	0
К10	0	0,000 440	0	0
К11	0,000 670	0	0	0
К12	0	0	0	0,000 010
К13	0,000 180	0	0	0
К14	0	0,000 580	0	0
К15	0	0	0,000 001	0
К16	0,000 010	0	0	0
К17	0	0	0,000 050	0
К18	0	0,000 010	0	0

Таблица 3

Векторы вероятностей использования диапазонов и векторы весов транзакции T1

Класс	Вероятности использования диапазонов				$W1i$
	1	2	3	4	
К1	0	0,100 000	0,900 000	0	0,999 937
К2	0,500 000	0,500 000	0	0	1
К4	0	0,140 000	0,030 000	0,830 000	0,999 959
К5	0,150 000	0,250 000	0	0,6	1
К6	0,005 000	0,044 000	0,456 000	0,495 000	0,999 998
К8	0	0,550 000	0,262 000	0,188 000	0,999 983
К9	0,999 000	0,001 000	0	0	1
К11	0	0,727 000	0,005 000	0,268 000	1
К13	1	0	0	0	0,999 820
К14	0	0,441 000	0,334 000	0,225 000	0,999 744
К15	0	0,456 000	0	0,544 000	1
К17	0,745 000	0,111 000	0	0,144 000	1
К18	0	0,498 000	0,229 000	0,273 000	0,999 995

Таблица 4

Векторы вероятностей использования диапазонов и векторы весов транзакции T2

Класс	Вероятности использования диапазонов				$W2i$
	1	2	3	4	
К1	0,045 000	0,665 000	0	0,290 000	1
К2	0	0	0,546 000	0,454 000	0,999 990
К3	0,564 000	0,339 000	0,097 000	0	0,999 933
К4	0,002 200	0,056 800	0,655 000	0,286 000	0,999 986
К5	0	0,500 000	0	0,500 000	1
К6	0	0,556 000	0,444 000	0	1
К16	0,800 000	0,180 000	0,020 000	0	0,999 992
К17	0,100 000	0	0,900 000	0	0,999 955
К18	0,003 000	0	0,664 000	0,333 000	1

Таблица 5

Векторы вероятностей использования диапазонов и векторы весов транзакции T3

Класс	Вероятности использования диапазонов				W_{3i}
	1	2	3	4	
K2	0	0,333 000	0,667 000	0	0,999 993
K3	0,995 000	0,001 000	0,004 000	0	0,999 998
K5	0,250 000	0,250 000	0,500 000	0	0,999 990
K7	0,333 000	0,333 000	0	0,334 000	1
K8	0	0,125 000	0,125 000	0,750 000	0,999 933
K10	0,334 000	0,556 000	0,001 000	0,109 000	0,999 755
K12	0,669 000	0,223 000	0,002 000	0,106 000	0,999 999
K15	0,550 000	0,330 000	0	0,120 000	1
K16	0	0	0,500 000	0,500 000	1
K17	0,222 000	0,650 000	0,128 000	0	0,999 994

Таблица 6

Векторы вероятностей использования диапазонов и векторы весов транзакции T4

Класс	Вероятности использования диапазонов				W_{4i}
	1	2	3	4	
K6	0	1	0	0	1
K7	0,250 000	0,250 000	0,250 000	0,250 000	0,999 725
K8	0	0,333 000	0,556 000	0,111 000	0,999 990
K15	0	0,333 000	0	0,667 000	1
K16	0,333 000	0,333 000	0,334 000	0	0,999 997
K17	0	0,999 000	0,001 000	0	1
K18	0,250 000	0,125 000	0	0,625 000	0,999 999

Таким образом, при работе с данными типами документов система будет давать сбой в 351 случае из 10^6 при условии, что оператор не совершает ошибок. В результате реального теста, по которому был сделан расчет, из 10^6 транзакций неуспешно завершились 338 транзакций.

Ценность эксперимента заключается в том, что были выявлены классы и их входные диапазоны, которые вносят наибольший вес в вероятность сбоя. Это позволило уделить больше внимания тестированию и выявлению ошибок в коде именно в узких местах тестируемой системы.

Наибольший вес в вероятность сбоя вносят классы K7, K10, K14. Уменьшив вероятность сбоя на входных диапазонах в этих классах в два раза, можно достичь следующих результатов:

$$Rt_1 = 0,999\ 564; Rt_2 = 0,999\ 855; Rt_3 = 0,999\ 784; Rt_4 = 0,999\ 860.$$

В результате получаем новую транзакционную надежность:

$$R_{tr} = 0,999\ 750.$$

4. Фаза эксплуатации. Вычислим коэффициент готовности системы S , для чего необходимо получить значения среднего времени простоя системы (TR) и среднего времени появления сбоя ($MTTF$) (табл. 7). В качестве исходных данных используются PU_i – вероятность использования компонента i , PF_i – вероятность сбоя в компоненте i , TA_i – относительное время доступа к компоненту i , TU_i – относительное время использования компонента i .

Коэффициент готовности системы вычисляется по формуле

$$S = MTTF / (MTTF + TR). \quad (4)$$

Условные вероятности сбоев PL_{ij} на практике оказываются равными 0, если выходные значения одного клас-

са проверяются на входе другого класса, иначе сбой распространяется в другой класс и тогда условная вероятность не равна 0:

$$- TR = 0,000\ 018\ с;$$

$$- MTTF = 2\ 045\ с;$$

$$- S = 0,999\ 998.$$

Наибольший вес в вероятность сбоя вносили классы K7, K10, K14. В результате уменьшения вероятности сбоя в соответствующих входных диапазонах удалось найти узкие места в системе. Получены новые показатели:

$$- TR = 0,000\ 015\ с;$$

$$- MTTF = 2\ 045,1\ с;$$

$$- S = 0,999\ 999.$$

Таким образом, в результате анализа практических результатов, полученных в ходе реализации реальных проектов, можно сделать следующие выводы:

- на фазе кодирования и тестирования компонентов можно получить оценочное время тестирования каждого компонента ПО (в человеко-часах), необходимое для достижения заданной надежности R_m , что полезно при планировании проектных работ. Практические результаты показали, что оценочное время отклоняется от реального не более чем на 5 %;

- на фазе полного тестирования системы можно найти узкие места в системе – те компоненты, которые вносят наибольший вес в вероятности сбоя;

- имея точную информацию о том, какие именно операционные профили и входные диапазоны имеют наибольшую вероятность сбоя, затрачивается меньше времени на поиск и устранение ошибок в коде;

- для готовой системы обработки и хранения информации с заданными операционными профилями

можно подсчитать итоговую транзакционную надежность и коэффициент готовности системы, а также отслеживать их изменения в ходе устранения ошибок в узких местах.

Таблица 7

Исходные данные для вычисления TR и MTTF

Класс	PU_i	PF_i	TA_i (мсек)	TU_i (мсек)
K1	0,001 000	0,000 063	0,100 000	1,400 000
K2	0,130 000	0,000 017	0,700 000	1,600 000
K3	0,105 000	0,000 069	0,400 000	2,100 000
K4	0,062 000	0,000 056	0,900 000	0,900 000
K5	0,053 000	0,000 010	0,200 000	3,700 000
K6	0,074 000	0,000 002	0,200 000	6,200 000
K7	0,004 000	0,000 275	0,500 000	1,100 000
K8	0,003 000	0,000 094	0,800 000	0,900 000
K9	0,029 000	0,000 000	0,900 000	0,300 000
K10	0,107 000	0,000 245	0,100 000	0,100 000
K11	0,151 000	0,000 000	0,100 000	0,600 000
K12	0,093 000	0,000 001	0,400 000	0,600 000
K13	0,033 000	0,000 180	0,700 000	2,700 000
K14	0,037 000	0,000 256	0,200 000	3,400000
K15	0,075 000	0,000 000	0,400 000	5,200 000
K16	0,022 000	0,000 011	0,100 000	6,400 000
K17	0,018 000	0,000 051	0,600 000	1,800 000
K18	0,003 000	0,000 006	0,800 000	6,200 000

Библиографический список

1. Липаев, В. В. Надежность программных средств / В. В. Липаев. М.: СИНТЕГ, 1998.
2. Ковалев, И. В. Надежность технологий обработки данных в информационно-управляющих системах / И. В. Ковалев // Решетневские чтения: материалы VII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, 11–12 нояб. 2004, г. Красноярск / СибГАУ. Красноярск, 2004. С. 147–148.
3. Lyu, M. R. Handbook of Software Reliability Engineering / M. R. Lyu // IEEE Computer Society Press and McGraw-Hill Book Company. 1996.
4. Grams, T. The Poverty of Reliability Growth Models / T. Grams // FastAbstract ISSRE. 1999.
5. Goseva-Popova, K. How Different Architecture Based Software Reliability Models are Reelated / K. Goseva-Popova, K. S. Trivedi, A. P. Mathur // FastAbstract ISSRE. 2000.
6. Hamlet, D. Foundational Theory of Software Component Reliability / D. Hamlet, D. Mason, D. Wiot // FastAbstract ISSRE. 2000.
7. Юнусов, Р. В. Оценка надежности программного обеспечения клиент-сервер на примере комплексной системы управления предприятием «Галактика» / Р. В. Юнусов // Вестник НИИ СУВПТ / НИИ СУВПТ. Вып. 7. Красноярск, 2001. С. 107–112.

I. V. Kovalev, A. A. Stupina, E. S. Gavrilov

INFORMATION PROCESSING RELIABILITY OF THE REAL-TIME CONTROL SYSTEMS

The software testing problem of the real-time control systems presents a kind of very complex problem. It's difficult to construct the software reliability model subject to the resource, time and budget constraints. In this view, exploiting of transaction reliability model for the information processing in the real-time control systems looks more rational.

И. Краус, Г. Госманова, М. Колега

ФИЗИКА В ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ

Приводятся принципы рентгеновского дифракционного метода измерения остаточных макроскопических напряжений. На проблематике, решаемой в рентгенографической лаборатории Чешского технического университета, иллюстрируются возможности применения этой неразрушающей диагностики в машиностроении.

Остаточные напряжения и особенности их дифракционного анализа. Эксплуатационная надежность изделий зависит не только от качества исходных материалов, но и от вида их обработки. После любого вида обработки: механической, термической или термической, комбинированной с химической, – тела приобретают новое свойство – состояние остаточной напряженности. Его анализ является такой же важной составной частью технической диагностики, как и определение прочности, твердости, сопротивляемости истиранию или коррозии.

Остаточные напряжения могут быть как полезными, так и вредными [1]. К первым принадлежат, например, напряжения сжатия, действующие в поверхностных слоях металлов и сплавов, где они повышают предел усталости и коррозионную стойкость. Отрицательное действие остаточных напряжений (как правило, растяжения) проявится в возникновении трещин, коррозии под напряжением, понижении предела выносливости. Если остаточные напряжения полезны, то технологии стремятся к их стабилизации. Постоянство же растяжений во времени неблагоприятно, поэтому скрытую в них опасность следует ограничить, т. е. уменьшить их величину таким образом, чтобы даже после суперпозиции с приложенными извне напряжениями не было достигнуто некоторого критического значения.

Напряжения являются производной величиной и определяются поэтому не прямо, а по измеренной деформации с помощью закона Гука или по известной зависимости подходящей магнитной, электрической, акустической или оптической величины от напряжений. Но ни один из используемых способов определения остаточных напряжений не является универсальным. Отдельные методы можно с успехом применять только для определенных материалов (кристаллические, прозрачные, ферромагнитные и т. д.) и состояний напряженности (поверхностное, объемное), тогда как любой относительный тензометрический анализ, как правило, достаточно достоверен, а при описании состояния напряженности с помощью различных методов нельзя исключить получение значений, отличающихся друг от друга даже на порядок. Подобное несоответствие может возбудить сомнения и в серьезных научных результатах.

Предпосылкой для правильной интерпретации заключений, полученных с помощью различных тензометрических методов, является понимание условий, при которых были определены исходные экспериментальные данные (деформация или значения оптических, магнитных и других величин). Существо проблемы можно проиллюстрировать на принципах двух групп тензометрических

методов, принадлежащих к наиболее распространенным. Первые основаны на точном измерении изменений формы (профиля) напряженного объема, целостность которого была нарушена. Ко второй категории принадлежат неразрушающие методы, использующие для расчета напряжений рентгенографически установленные деформации решетки.

Причин, по которым нельзя ожидать, что анализ данного типа напряженности, произведенный этими двумя методиками, приведет к одинаковым численным значениям, несколько. В первом случае мы получаем данные о макроскопической деформации более-менее изотропной среды, во втором с помощью невидимых лучей измеряются микроскопические изменения межатомных расстояний в кристаллической решетке, анизотропной по своим физическим и механическим свойствам. Кроме того, рентгенографическая информация относится только к поверхностным слоям толщиной около нескольких микрометров.

Исследования в области промышленного применения рентгенографических дифракционных методов начались в Чешском техническом университете (ЧТУ) в начале 1960-х гг. Тематика, которой занимается рентгенографическая лаборатория ЧТУ в настоящее время, разнообразна. Машиностроительные заводы интересуют характеристики остаточной напряженности в поверхностных слоях винтовых пружин, коробках передач легковых автомобилей, осях тепловозов, коленчатых валах, шестернях, прокатанных стальных листах и резьбе, полученной с помощью различных технологий [2]. Подробно анализируются состояния напряжений, возникших в поверхностных слоях металлов в результате обработки лазерными или электронными пучками, после шлифования, обточки, фрезерования, дробеструйной обработки и индукционной закалки. Исследуются различные причины релаксации остаточных напряжений в машиностроительных деталях. А в последнее время предметом исследований, помимо металлов и сплавов, стала перспективная техническая керамика.

Рассмотрим далее две проблемы, представляющие несомненный научный интерес: исследование микроструктуры и свойств поверхности стали, упрочненной лазерным нагревом, и исследование напряжений в образцах из сплавов циркония после высокотемпературного окисления.

Исследование микроструктуры и свойств поверхности стали, упрочненной лазерным нагревом. Термическая обработка материалов лазерным излучением позволяет модифицировать поверхностные свойства облуча-

емых объектов без изменения их объемных характеристик. Сфокусированный лазерный луч позволяет локально достичь высокой концентрации энергии и температуры за такое малое время, что медленные процессы теплоизлучения и проводимости не успевают развиваться. Поэтому лазерными лучами можно обрабатывать тонкие поверхностные слои, не воздействуя на внутреннюю структуру. Лазерная термическая обработка часто используется для упрочнения поверхности деталей и конструктивных элементов, работающих в условиях интенсивного износа.

Целью исследования являлось определение влияния технологии лазерной обработки на фазовый состав, микротвердость и состояние макроскопической напряженности в поверхностных слоях стали.

Исследуемые образцы с размерами $100 \times 50 \times 10$ мм были изготовлены из горячекатаной прутковой стали 12050, отшлифованы, отожжены при 550°C на воздухе в течение 1 ч для снятия напряжений и постепенно охлаждены в печи. Лазерная обработка производилась непрерывным газовым лазером CO_2 с мощностью 2 500 Вт. Несфокусированный луч в месте падения на образец имел диаметр 6 мм. При термической обработке образцы передвигались относительно луча со скоростью 700 мм/мин (образец FE121) или 1 100 мм/мин (образец FE122).

Применялись следующие экспериментальные методики.

Металлографическая оценка образцов производилась с помощью оптического микроскопа «Nikon Epihot 200», цифровой фотокамеры «Basler» и автоматического анализатора «Lucia».

Микротвердость измерялась на приборе «Fisher Score H100» с классической пирамидой Виккерса и нагрузкой 1 Н. Распределение микротвердости $\text{HV}_{0,1}$ определялось как на поверхности образца (после удаления слоя толщиной 20 мкм), так и на боковом металлографическом шлифе, в обоих случаях перпендикулярно к следу лазерного луча.

Рентгеновский тензометрический анализ проводился на дифрактометре «D8-Discover» (fa Bruker) с текстурным гониометром и лазерным пеленгатором анализируемой области, сопряженным с видеокамерой и двухкоординатным детектором «HI-Star». Круглый коллиматор излучения $\text{CoK}\alpha$ имел диаметр 0,5 мм. Образец осциллировал в направлении измеряемых напряжений в интервале ± 5 мм. Величины напряжений σ_φ , рассчитанные по смещению дифракционной линии $\{220\} \alpha\text{-Fe}$ [1], были определены на обработанной поверхности образца как в перпендикулярном (σ_\perp), так и в параллельном (σ_\parallel) направлениях относительно следа лазерного луча. Для распределения напряжений по глубине под обработанной лазером поверхностью материал образца постепенно стравливался на приборе «Lectropol-5» (fa Struers). Площадь отполированной области составляла 30×15 мм.

Были получены следующие результаты:

1. На образцах стали 12050 с ферритно-перлитной структурой после термической обработки лазером возник заметный след (полоса), ограниченный линией аустенитного превращения. Полосу можно разделить (в направлении от поверхности внутрь матрицы) на мартенситную, бейнитную и ферритно-бейнитную области (рис. 1).

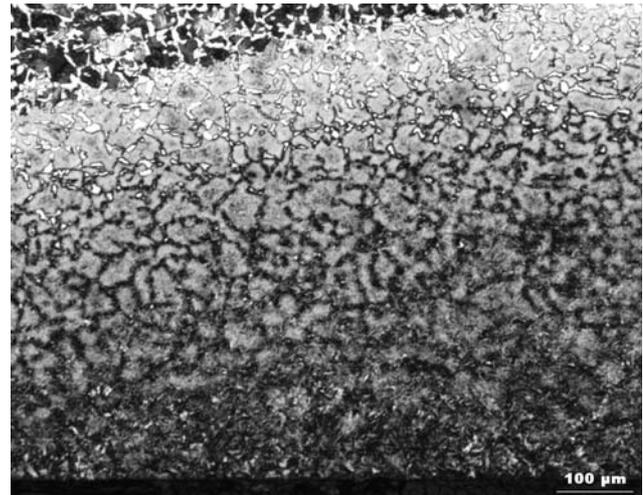


Рис. 1. Структура зоны, модифицированной лазерным лучом (увеличение 100 х)

2. После отшлифовки поверхностного слоя толщиной около 20 мкм микротвердость $\text{HV}_{0,1}$ в направлении перпендикулярном к оси полосы на поверхности образцов Fe121 и Fe122, имела распределение (рис. 2, а). В области полосы величины $\text{HV}_{0,1}$ были в 3,5 раза (Fe121) и 2,8 раза (Fe122) больше, чем в матрице. Распределения микротвердости $\text{HV}_{0,1}$ по глубине у обоих образцов отличаются только тс

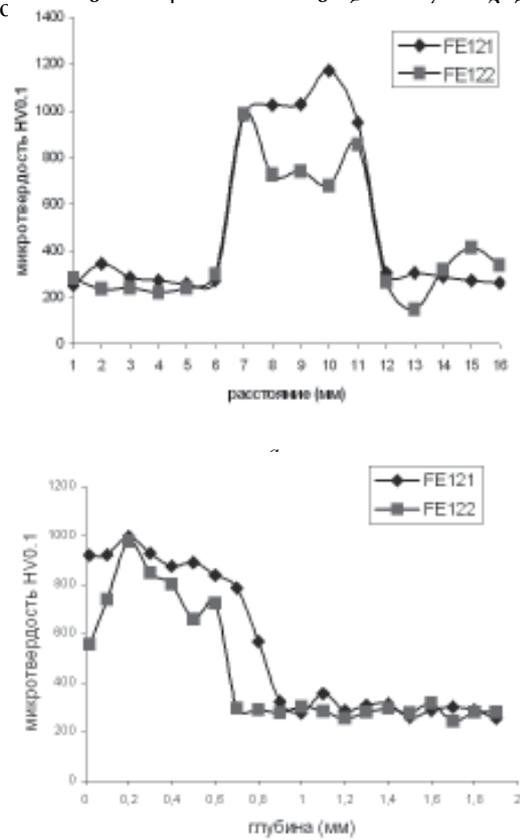


Рис. 2. Микротвердость $\text{HV}_{0,1}$, измеренная на поверхности образца по направлению, перпендикулярному к следу лазерного луча (а), и распределение микротвердости по глубине облученной зоны образца (б)

3. Остаточные напряжения измерялись в каждой из 16 выбранных точек (со взаимным расстоянием 1 мм) в двух направлениях относительно оси полосы: параллельном (σ_{\parallel}) и перпендикулярном (σ_{\perp}). Измерения проводились до глубины приблизительно 1 мм. Типичное распределение остаточных напряжений после электролитического травления до глубины 370 мкм показано на рис. 3. В центральной области полосы (упрочненная область) напряжения в обоих направлениях измерения имели характер сжатия, на границе «лазерный след – базовый материал» возникли напряжения растяжения (50...250 МПа). В области матрицы (вне полосы) напряжения опять приняли характер сжатия в пределах от 0 до -100 МПа.

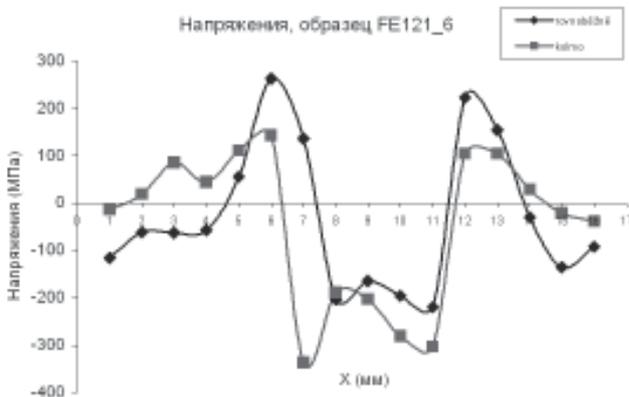


Рис. 3. Остаточные напряжения на поверхности образца Fe121-6 (на глубине 370 мкм) в направлении параллельном (σ_{\parallel}) и перпендикулярном (σ_{\perp}) к следу лазерного луча

4. Распределение напряжений и ширины дифракционной линии по глубине (рис. 4) свидетельствует о том, что лазерная обработка оказала влияние на материал образца до глубины 0,8 мм. В этой области возникли напряжения сжатия (до 400 МПа), для более глубоких слоев материала характерны напряжения растяжения.

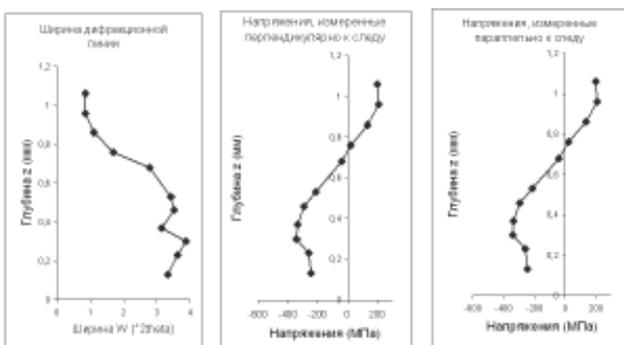


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений σ_{\perp} , σ_{\parallel} и ширины W дифракционной линии в плоскости разреза, перпендикулярного к поверхности образца Fe121

Исследование напряжений в образцах из сплавов циркония после высокотемпературного окисления. Повышение требований к экономике и безопасности атомных электростанций ведет к оптимизации свойств сплавов циркония, используемых в качестве оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Успешное решение этого вопроса обусловлено пониманием меха-

низмов коррозии, которая лимитирует как долговечность тепловыделяющих элементов, так и степень выгорания топлива. Главной задачей исследовательских программ, направленных на изучение механизма окисления сплавов циркония, является выявление взаимоотношения между их поведением в агрессивной среде теплоносителя и свойствами окисных слоев, возникающих на поверхности оболочек. К фундаментальным свойствам окисных слоев относятся высокие напряжения роста, влияющие на ряд их физических характеристик (микроструктура, фазовый состав и др.).

Целью исследования являлось определение с помощью рентгеновского дифракционного анализа состояния и эволюции напряженности в окисных слоях, возникающих на поверхности сплавов циркония в среде, имитирующей некоторые условия теплоносителя. Одновременно определялись напряжения в слоях металла, прилегающего к границе системы «окись – металл».

Исследуемые образцы представляли собой части трубок (валики) длиной 15 мм и диаметром 9 мм из конвенционного сплава Zircaloy-4 (Zry-4S) и сплава Zircaloy-4 со сниженным содержанием Sn (Zry-4W). Образцы подвергались окислению в течение разных промежутков времени в воде с добавкой 40 ppm O_2 при 360 °С.

Использовалась следующая методика: макроскопические напряжения определялись по методу суммы главных напряжений с применением эталона. Измерение относительной деформации системы плоскостей $\{104\}$ моноклинной двуокиси ZrO_2 и системы плоскостей $\{112\}$ металлического Zr проводилось в шаговом режиме на $\theta/2\theta$ дифрактометре «Siemens» с излучением $CrK \alpha$. Величина напряжений считалась средней для поверхностного слоя, сравнимого по толщине с эффективной глубиной проникновения использованного излучения в материал (приблизительно 2,5 мкм для окиси и 1,7 мкм для металла).

В ходе работы были получены следующие результаты:

1. В слоях ZrO_2 были обнаружены только напряжения сжатия, достигающие на начальных стадиях окисления величины -1,1 ГПа. В слоях металла были обнаружены только напряжения растяжения, достигающие величины 250 МПа (рис. 5). Подобное распределение напряжений в системе «окись – металл» было найдено и для других сплавов Zr, окислявшихся в иных средах [3].

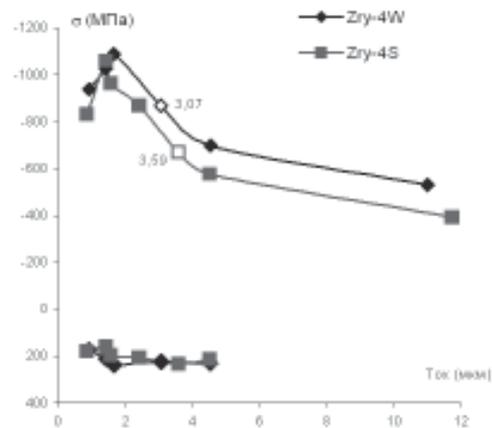


Рис. 5. Зависимость рентгенографически определенных напряжений от толщины $T_{ок}$ для окисных и металлических слоев сплавов Zry-4W и Zry-4S

2. Вместе с другими рентгенографически определенными характеристиками (величиной когерентных областей D и микродеформаций ϵ) эти результаты подтверждают представление о механическом поведении системы «окись – металл» как целого. Слои окиси подверглись высокой степени пластической деформации, тогда как для слоев металла эффект пластической деформации был пренебрежимо мал.

3. За величину, характеризующую эволюцию напряжений в окиси, можно принять $R = \sigma/t$, где σ – рентгенографически определенные напряжения; t – соответствующее время окисления [4]. Оказывается, что в области малых толщин окиси (< 10 мкм) зависимость этой величины от экспериментально установленной для данных промежутков времени толщины окиси $T_{\text{окс.эксп}}$ имеет простой вид $R = A (T_{\text{окс.эксп}})^{-m}$ (рис. 6). С помощью постоянных A и m по приведенному выражению можно рассчитать кривую «окисление – время $T_{\text{окс.калс}}(t)$ ».

4. Сравнение экспериментальных и рассчитанных кривых окисления (рис. 7) показывает, что их расхождение начинается в точке, когда экспериментальная кривая меняет вид зависимости со степенной на линейную (это так называемый переход кинетики окисления). Этот результат свидетельствует о тесной связи двух независимо установленных характеристик окисных слоев: величины напряжений и толщины, зависящей только от кинетики окисления.

Эта работа была выполнена при поддержке МО Чешской Республики (проекты LN-00B084 и MSM-210000021).

Библиографический список

1. Kraus, I. Rentgenová tenzometrie / I. Kraus, V. V. Trofimov. Praha: Academia, 1988.

2. Kraus, I. X-ray analysis of the inhomogeneous stress state / I. Kraus, N. Ganey // Defect and Microstructure Analysis by Diffraction / ed. R. L. Snyder. Oxford: University Press, 1999.

3. Gosmanova, G. X-ray stress analysis of oxidized Zr-based alloys / G. Gosmanova, I. Kraus, N. Ganey // Proc. of SPIE. Vol. 4627. 2002. P. 221–224.

4. Gosmanova, G. On the relation of residual stresses in oxide layers and corrosion kinetics of Zr-based alloys / G. Gosmanova, I. Kraus, N. Ganey // Proc. of SPAS. Vol. 6. 2002. D. 13–16.

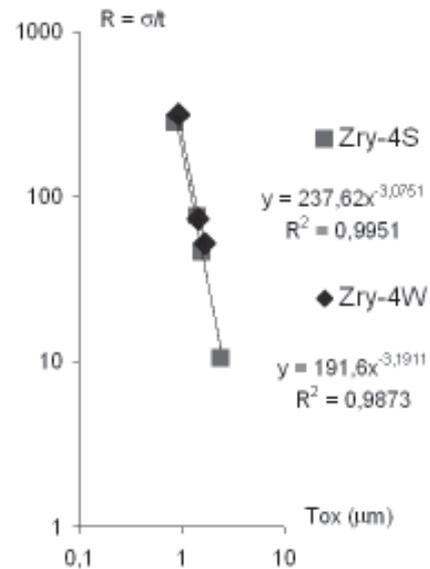


Рис. 6. Зависимость $R = \sigma/t$ от толщины $T_{\text{ок}}$ для окисных слоев исследуемых сплавов

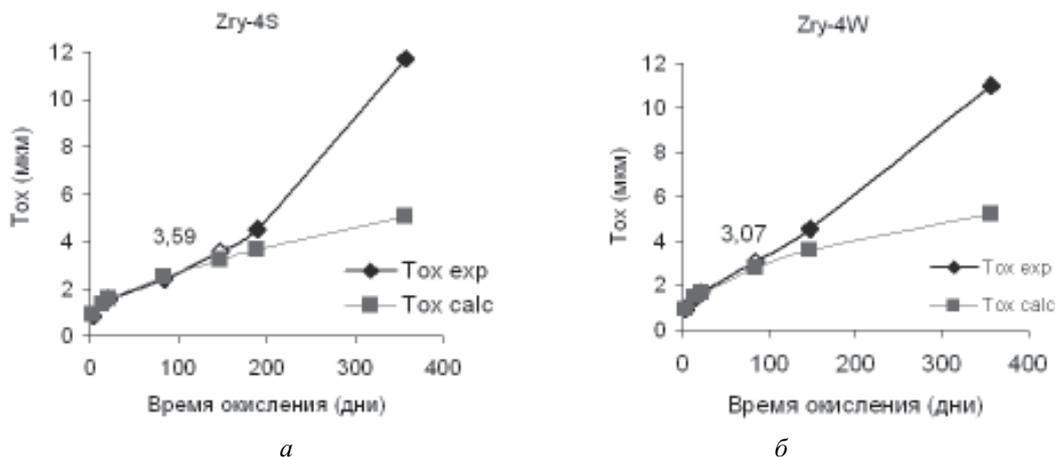


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные кривые окисления сплавов Zry-4S (а) и Zry-4W (б). Пустой символ означает декларируемую точку перехода кинетики окисления

I. Kraus, G. Gosmanova, M. Kolega

PHYSICS IN INDUSTRY

The principles of X-ray diffraction method of macroscopic residual stresses measurements are presented in the article. The possibilities of this non-destructive material diagnostics in the engineering are described on the some examples of research have been carried out on the X-ray laboratory of CTU

А. В. Лопатин, А. Н. Демирин

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ АНИЗОТРОПИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОМПОЗИТНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ОСЕВОМ СЖАТИИ

Рассматривается задача устойчивости композитной цилиндрической оболочки, стенка которой состоит из слоев одинаковой толщины, армированных под углом $\pm\varphi$ к образующей. Показано, что при определенном отношении толщины стенки к толщине слоя структура стенки необходимо считать анизотропной. Исследовано влияние структурной анизотропии на устойчивость оболочки, нагруженной осевой сжимающей силой.

Рассмотрим слоистую цилиндрическую оболочку, нагруженную осевыми сжимающими усилиями T (рис. 1). В качестве носителя формы оболочки примем ее срединную поверхность. Отнесем эту поверхность к системе криволинейных координат $\alpha\beta\gamma$. Направим ось α по образующей, ось β – по окружности цилиндра, образованного срединной поверхностью, а ось γ – по нормали к срединной поверхности. Обозначим через l длину оболочки, через R – радиус срединной поверхности оболочки.

Типичной структурой стенки композитной цилиндрической оболочки является система слоев одинаковой толщины, армированных под углом к образующей цилиндра. Как правило, слою с углом армирования $+\varphi$ соответствует такой же слой с углом армирования $-\varphi$ (рис. 2).

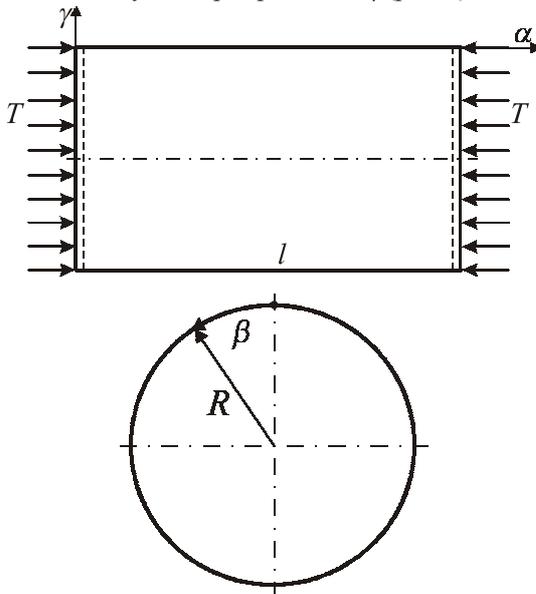


Рис. 1. Напряжение оболочки

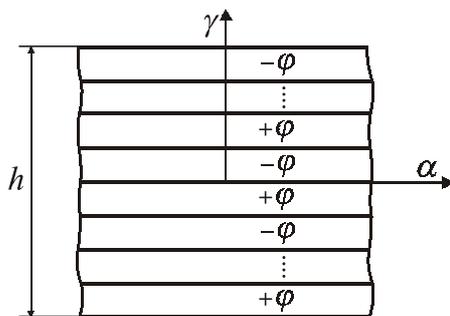


Рис. 2. Схема армирования стенки оболочки

Подобные слоистые структуры принято считать ортотропными. Однако это утверждение является справедли-

вым только в том случае, когда число слоев, формирующих стенку оболочки, велико. При определенном отношении толщины стенки к толщине слоя структура стенки, состоящая из слоев с углами армирования $\pm\varphi$, должна рассматриваться как анизотропная. Для доказательства этого утверждения выполним анализ жесткостных параметров в физических соотношениях, записанных в характерном для анизотропных оболочек виде:

$$\begin{aligned} N_\alpha &= B_{11}\varepsilon_\alpha + B_{12}\varepsilon_\beta + \underline{B}_{13}\varepsilon_{\alpha\beta} + \underline{C}_{11}\chi_\alpha + \underline{C}_{12}\chi_\beta + C_{13}\chi_{\alpha\beta}, \\ N_\beta &= B_{21}\varepsilon_\alpha + B_{22}\varepsilon_\beta + \underline{B}_{23}\varepsilon_{\alpha\beta} + \underline{C}_{21}\chi_\alpha + \underline{C}_{22}\chi_\beta + C_{23}\chi_{\alpha\beta}, \\ N_{\alpha\beta} &= \underline{B}_{31}\varepsilon_\alpha + \underline{B}_{32}\varepsilon_\beta + B_{33}\varepsilon_{\alpha\beta} + C_{31}\chi_\alpha + C_{32}\chi_\beta + C_{33}\chi_{\alpha\beta}, \\ M_\alpha &= \underline{C}_{11}\varepsilon_\alpha + \underline{C}_{12}\varepsilon_\beta + C_{13}\varepsilon_{\alpha\beta} + D_{11}\chi_\alpha + D_{12}\chi_\beta + \underline{D}_{13}\chi_{\alpha\beta}, \\ M_\beta &= \underline{C}_{21}\varepsilon_\alpha + \underline{C}_{22}\varepsilon_\beta + C_{23}\varepsilon_{\alpha\beta} + D_{21}\chi_\alpha + D_{22}\chi_\beta + \underline{D}_{23}\chi_{\alpha\beta}, \\ M_{\alpha\beta} &= C_{31}\varepsilon_\alpha + C_{32}\varepsilon_\beta + \underline{C}_{33}\varepsilon_{\alpha\beta} + \underline{D}_{31}\chi_\alpha + \underline{D}_{32}\chi_\beta + D_{33}\chi_{\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $N_\alpha, N_\beta, N_{\alpha\beta}$ – мембранные усилия; M_α, M_β – изгибающие моменты; $M_{\alpha\beta}$ – крутящий момент; $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \varepsilon_{\alpha\beta}$ – компоненты мембранной деформации; χ_α, χ_β – компоненты изгибной деформации; $\chi_{\alpha\beta}$ – компоненты крутильной деформации; B, C, D – мембранные, смешанные и изгибные жесткостные параметры стенки оболочки.

Жесткостные параметры стенки оболочки определяются по формулам [1]

$$B_{mn} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} A_{mn} d\gamma, \quad C_{mn} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} A_{mn} \gamma d\gamma, \quad D_{mn} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} A_{mn} \gamma^2 d\gamma, \quad (2)$$

$(mn = 11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33)$

где h – толщина оболочки; A_{mn} – коэффициенты жесткости слоев. Для слоя, армированного под углом φ к оси α , величины A_{mn} определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \bar{E}_1 c^4 + \bar{E}_2 s^4 + 2\bar{E}_{12} c^2 s^2, \\ A_{13} &= c s [\bar{E}_1 c^2 - \bar{E}_2 s^2 - \bar{E}_{12} (c^2 - s^2)], \\ A_{23} &= c s [\bar{E}_1 s^2 - \bar{E}_2 c^2 + \bar{E}_{12} (c^2 - s^2)], \\ A_{12} &= \bar{E}_1 \mu_{12} + (\bar{E}_1 + \bar{E}_2 - 2\bar{E}_{12}) c^2 s^2, \\ A_{22} &= \bar{E}_1 s^4 + \bar{E}_2 c^4 + 2\bar{E}_{12} c^2 s^2, \\ A_{33} &= (\bar{E}_1 + \bar{E}_2 - 2\bar{E}_{12} \mu_{12}) c^2 s^2 + G_{12} (c^2 - s^2)^2, \quad (3) \\ A_{21} &= A_{12}, \quad A_{31} = A_{13}, \quad A_{32} = A_{23}, \quad \bar{E}_{12} = \bar{E}_1 \mu_{12} + 2G_{12}, \\ \bar{E}_1 &= \frac{E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}, \quad \bar{E}_2 = \frac{E_2}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}, \\ c &= \cos \varphi, \quad s = \sin \varphi. \end{aligned}$$

Здесь E_1, E_2 – модули упругости в направлении армирования и направлении, перпендикулярном ему; G_{12} – модуль сдвига; μ_{12}, μ_{21} – коэффициенты Пуассона.

Коэффициенты жесткости A_{mn} рассматриваемой слоистой структуры (см. рис. 2) являются кусочно-постоянными функциями координаты γ . Выполняя в формулах (2) интегрирование по слоям для жесткостных параметров B, C, D , получим выражения

$$\begin{aligned} B_{mn} &= \frac{h}{2} (A_{mn}^{(-)} + A_{mn}^{(+)}), & C_{mn} &= (-1)^{\frac{k}{2}} \frac{h^2}{4k} (-A_{mn}^{(-)} + A_{mn}^{(+)}), \\ D_{mn} &= \frac{h^4}{24} (A_{mn}^{(-)} + A_{mn}^{(+)}), \end{aligned} \quad (4)$$

($mn = 11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33$),

где k – число слоев; $A_{mn}^{(-)}$ – коэффициент жесткости слоя с углом армирования $-\varphi$; $A_{mn}^{(+)}$ – коэффициент жесткости слоя с углом армирования $+\varphi$.

Вернемся теперь к формулам (3), определяющим для заданного материала зависимость коэффициентов жесткости от угла армирования. Подставляя в них углы $-\varphi$ и $+\varphi$ и сравнивая величины $A_{mn}^{(-)}$ и $A_{mn}^{(+)}$, получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned} A_{mn}^{(-)} &= A_{mn}^{(+)}, & \text{если } mn &= 11, 12, 21, 22, 33; \\ A_{mn}^{(-)} &= -A_{mn}^{(+)}, & \text{если } mn &= 13, 23, 31, 32. \end{aligned} \quad (5)$$

Преобразуем далее равенства (4). С учетом соотношения (5) будем иметь

$$\begin{aligned} B_{mn} &= \begin{cases} h A_{mn}^{(+)}, & \text{если } mn = 11, 12, 21, 22, 33, \\ 0, & \text{если } mn = 13, 23, 31, 32, \end{cases} \\ C_{mn} &= \begin{cases} (-1)^{\frac{k}{2}} \frac{h^2}{2k} A_{mn}^{(+)}, & \text{если } mn = 13, 23, 31, 32, \\ 0, & \text{если } mn = 11, 12, 21, 22, 33, \end{cases} \\ D_{mn} &= \begin{cases} \frac{h^3}{12} A_{mn}^{(+)}, & \text{если } mn = 11, 12, 21, 22, 33, \\ 0, & \text{если } mn = 13, 23, 31, 32. \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

Подведем некоторые итоги. В физических соотношениях (1) подчеркнутые члены в соответствии с равенством (6) обращаются в ноль. Однако смешанные жесткости $C_{13}, C_{23}, C_{31}, C_{32}$ для рассматриваемой слоистой структуры отличны от нуля. Их величина, как это следует по формулам (6), обратно пропорциональна числу слоев k . Только при достаточно больших значениях k смешанные жесткости $C_{13}, C_{23}, C_{31}, C_{32}$ можно рассматривать как малые величины, а слоистую структуру стенки – как ортотропную. Таким образом, физические соотношения (1) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} N_\alpha &= B_{11}\varepsilon_\alpha + B_{12}\varepsilon_\beta + C_{13}\chi_{\alpha\beta}, & N_\beta &= B_{21}\varepsilon_\alpha + B_{22}\varepsilon_\beta + C_{23}\chi_{\alpha\beta}, \\ N_{\alpha\beta} &= B_{33}\varepsilon_{\alpha\beta} + C_{31}\chi_\alpha + C_{32}\chi_\beta, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M_\alpha &= C_{13}\varepsilon_{\alpha\beta} + D_{11}\chi_\alpha + D_{12}\chi_\beta, & M_\beta &= C_{23}\varepsilon_{\alpha\beta} + D_{21}\chi_\alpha + D_{22}\chi_\beta, \\ M_{\alpha\beta} &= C_{31}\varepsilon_\alpha + C_{32}\varepsilon_\beta + D_{33}\chi_{\alpha\beta}. \end{aligned} \quad (8)$$

Оценим влияние смешанных жесткостей $C_{13}, C_{23}, C_{31}, C_{32}$ на несущую способность оболочки. Воспользуемся для решения задачи устойчивости цилиндрической композитной оболочки уравнениями технической теории. В рамках этой теории система уравнений, описывающая потерю устойчивости оболочки, помимо физических соотношений (7), (8) включает линеаризованные уравнения устойчивости:

$$\frac{\partial N_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial N_{\alpha\beta}}{\partial \beta} = 0, \quad \frac{\partial N_{\alpha\beta}}{\partial \alpha} + \frac{\partial N_\beta}{\partial \beta} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 M_\alpha}{\partial \alpha^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{\alpha\beta}}{\partial \alpha \partial \beta} + \frac{\partial^2 M_\beta}{\partial \beta^2} - \frac{N_\beta}{R} + N_\alpha^0 \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2} = 0; \quad (10)$$

геометрические соотношения:

$$\chi_\alpha = -\frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2}, \quad \chi_\beta = -\frac{\partial^2 w}{\partial \beta^2}, \quad \chi_{\alpha\beta} = -2 \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha \partial \beta}; \quad (11)$$

уравнение совместности деформаций

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_\alpha}{\partial \beta^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_\beta}{\partial \alpha^2} - \frac{\partial^2 \varepsilon_{\alpha\beta}}{\partial \alpha \partial \beta} - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2} = 0. \quad (12)$$

В уравнениях (9)–(12) не оговоренные ранее обозначения имеют следующее значение: w – прогиб оболочки, N_α^0 – мембранное усилие, соответствующее докритическому состоянию оболочки. Примем, что исходное напряженное состояние является безмоментным. Тогда для мембранного усилия N_α^0 будем иметь

$$N_\alpha^0 = -T. \quad (13)$$

В соответствии с традиционной схемой решения задач устойчивости цилиндрических оболочек в рамках технической теории введем функцию напряжений $f(\alpha, \beta)$ по формулам

$$N_\alpha = \frac{\partial^2 f}{\partial \beta^2}, \quad N_\beta = \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha^2}, \quad N_{\alpha\beta} = -\frac{\partial^2 f}{\partial \alpha \partial \beta}. \quad (14)$$

Подстановка усилий (14) в уравнение устойчивости (9) приводит к их тождественному удовлетворению. Получим разрешающую систему уравнений, содержащую в качестве неизвестных прогиб оболочки и функцию напряжений. Первоначально разрешим физические соотношения (7) относительно мембранных деформаций. В результате преобразования получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= E_{11} N_\alpha + E_{12} N_\beta - F_{13} \chi_{\alpha\beta}, \\ \varepsilon_\beta &= E_{21} N_\alpha + E_{22} N_\beta - F_{23} \chi_{\alpha\beta}, \\ \varepsilon_{\alpha\beta} &= E_{33} N_{\alpha\beta} - F_{31} \chi_\alpha - F_{32} \chi_\beta, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} E_{11} &= \frac{B_{22}}{B}; & E_{12} &= E_{21} = -\frac{B_{12}}{B}; \\ E_{22} &= \frac{B_{11}}{B}; & E_{33} &= \frac{1}{B_{33}}; & F_{13} &= \frac{B_{22}C_{13} - B_{12}C_{23}}{B}; \\ F_{23} &= \frac{B_{11}C_{23} - B_{21}C_{13}}{B}; & F_{31} &= \frac{C_{31}}{B_{33}}; \\ F_{32} &= \frac{C_{32}}{B_{33}}; & B &= B_{11}B_{22} - B_{12}^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Исключим далее мембранные деформации из физических соотношений (8). Подставляя (15) в (8), будем иметь

$$\begin{aligned} M_\alpha &= G_{13} N_{\alpha\beta} + H_{11} \chi_\alpha + H_{12} \chi_\beta, \\ M_\beta &= G_{23} N_{\alpha\beta} + H_{21} \chi_\alpha + H_{22} \chi_\beta, \\ M_{\alpha\beta} &= G_{31} N_\alpha + G_{32} N_\beta + H_{33} \chi_{\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} G_{13} &= C_{13}E_{33}; & G_{23} &= C_{23}E_{33}; & G_{31} &= C_{31}E_{11} + C_{32}E_{21}; & G_{32} &= C_{31}E_{12} + C_{32}E_{22}; \\ H_{11} &= D_{11} - C_{13}F_{31}; & H_{12} &= H_{21} = D_{12} - C_{13}F_{32}; \\ H_{22} &= D_{22} - C_{23}F_{32}; & H_{33} &= D_{33} - C_{31}F_{13} - C_{32}F_{23}. \end{aligned} \quad (18)$$

Затем, последовательно подставляя (17), (15), (14) и (13) в уравнения устойчивости (10) и совместности деформаций (12), получим

$$E_{11} \frac{\partial^4 f}{\partial \beta^4} + (2E_{12} + E_{33}) \frac{\partial^4 f}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + E_{22} \frac{\partial^4 f}{\partial \alpha^4} + (2F_{13} - F_{32}) \frac{\partial^4 w}{\partial \alpha \partial \beta^3} + (2F_{23} - F_{31}) \frac{\partial^4 w}{\partial \alpha^3 \partial \beta} - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2} = 0, (19)$$

$$(2G_{32} - G_{13}) \frac{\partial^4 f}{\partial \alpha^3 \partial \beta} + (2G_{31} - G_{23}) \frac{\partial^4 f}{\partial \alpha \partial \beta^3} - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 f}{\partial \alpha^2} - \left[H_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial \alpha^4} + 2(H_{12} + 2H_{33}) \frac{\partial^4 w}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + H_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial \beta^4} \right] - T \frac{\partial^2 w}{\partial \alpha^2} = 0.$$

Предполагая, что на краях оболочки выполняются условия шарнирного закрепления, представим решение уравнений (19) в виде тригонометрических рядов

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} (w_{nm}^{(1)} \cos \lambda_n \beta + w_{nm}^{(2)} \sin \lambda_n \beta) \sin \lambda_m \alpha, f = \sum_{m=1}^{\infty} (f_{nm}^{(1)} \cos \lambda_n \beta + f_{nm}^{(2)} \sin \lambda_n \beta) \sin \lambda_m \alpha, (20)$$

$$(n = 2, 3, \dots, \infty),$$

где $\lambda_m = m\pi/l$; $\lambda_n = n/R$; m – число полуволн вдоль образующей оболочки; n – число волн по окружности оболочки; $f_{nm}^{(v)}$, $w_{nm}^{(v)}$ ($v = 1, 2$) – неизвестные числа.

Подставляя разложения (20) в равенства (19), получим однородную систему линейных алгебраических уравнений:

$$a_{nm} f_{nm}^{(1)} + \frac{\lambda_m^2}{R} w_{nm}^{(1)} - \sum_{m_1=1}^{\infty} b_{nm_1} I_{mm_1} w_{nm_1}^{(2)} = 0, a_{nm} f_{nm}^{(2)} + \frac{\lambda_m^2}{R} w_{nm}^{(2)} - \sum_{m_1=1}^{\infty} b_{nm_1} I_{mm_1} w_{nm_1}^{(1)} = 0, c_{nm} w_{nm}^{(1)} - \frac{\lambda_m^2}{R} f_{nm}^{(1)} - \sum_{m_1=1}^{\infty} d_{nm_1} I_{mm_1} f_{nm_1}^{(2)} - T \lambda_m^2 w_{nm}^{(1)} = 0, (21)$$

$$c_{nm} w_{nm}^{(2)} - \frac{\lambda_m^2}{R} f_{nm}^{(2)} - \sum_{m_1=1}^{\infty} d_{nm_1} I_{mm_1} f_{nm_1}^{(1)} - T \lambda_m^2 w_{nm}^{(2)} = 0, (m = 1, 2, \dots, \infty, n = 2, 3, \dots, \infty),$$

где

$$a_{nm} = E_{11} \lambda_n^4 + (2E_{12} + E_{33}) \lambda_n^2 \lambda_m^2 + E_{22} \lambda_m^4; b_{nm_1} = \lambda_n \lambda_{m_1} [(2F_{13} - F_{32}) \lambda_n^2 + (2F_{23} - F_{31}) \lambda_{m_1}^2]; c_{nm} = H_{11} \lambda_m^4 + 2(H_{12} + 2H_{33}) \lambda_n^2 \lambda_m^2 + H_{22} \lambda_n^4; d_{nm_1} = \lambda_n \lambda_{m_1} [(2G_{32} - G_{13}) \lambda_m^2 + (2G_{31} - G_{23}) \lambda_{m_1}^2]; (22)$$

$$I_{mm_1} = \frac{2}{l} \int_0^l \sin \lambda_m \alpha \cos \lambda_{m_1} \alpha d\alpha = \begin{cases} 0, & \text{если } m \pm m_1 \text{ четно,} \\ \frac{4}{\pi} \frac{m}{m^2 - m_1^2}, & \text{если } m \pm m_1 \text{ нечетно.} \end{cases}$$

Исключим из уравнений (21) неизвестные $f_{nm}^{(v)}$ ($v = 1, 2$). В результате преобразований получим следующую систему уравнений:

$$p_{nm} w_{nm}^{(1)} - \sum_{m_1=1}^{\infty} r_{nm m_1} w_{nm_1}^{(1)} - \sum_{m_1=1}^{\infty} s_{nm m_1} w_{nm_1}^{(2)} - T w_{nm}^{(1)} = 0, p_{nm} w_{nm}^{(2)} + \sum_{m_1=1}^{\infty} s_{nm m_1} w_{nm_1}^{(1)} - \sum_{m_1=1}^{\infty} r_{nm m_1} w_{nm_1}^{(2)} - T w_{nm}^{(2)} = 0, (23)$$

$$(m = 1, 2, \dots, \infty, n = 2, 3, \dots, \infty),$$

где

$$p_{nm} = \frac{e_{nm}}{\lambda_m^2}; r_{nm m_1} = \frac{g_{nm m_1}}{\lambda_m^2}; s_{nm m_1} = \frac{h_{nm m_1}}{\lambda_m^2}; e_{nm} = c_{nm} + \frac{\lambda_m^4}{R^2 a_{nm}}; h_{nm m_1} = \frac{I_{mm_1}}{R} \left(\frac{\lambda_m^2 b_{m_1}}{a_{nm}} + \frac{\lambda_{m_1}^2 b_{nm}}{a_{m_1 m_1}} \right); g_{nm} = b_{nm} k_{nm}; k_{nm m_1} = \sum_{m_2=1}^{\infty} \frac{b_{nm_2}}{a_{m_2}} I_{m m_2} I_{m_2 m_1}. (24)$$

Удержим в бесконечных рядах (23) i членов по продольной координате α и j членов по окружной координате β . Перепишем систему (23) для выбранных i и j в виде матричных уравнений

$$(P_n - R_n) W_n^{(1)} - S_n W_n^{(2)} - T W_n^{(1)} = 0, S_n W_n^{(1)} + (P_n - R_n) W_n^{(2)} - T W_n^{(2)} = 0, (25)$$

$$(n = 2, 3, \dots, j),$$

где

$$W_n^{(v)} = \begin{Bmatrix} w_{n_1}^{(v)} \\ w_{n_2}^{(v)} \\ \vdots \\ w_{n_i}^{(v)} \end{Bmatrix}; P_n = \begin{Bmatrix} p_{n_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p_{n_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & p_{n_i} \end{Bmatrix}; R_n = \begin{Bmatrix} r_{n_{11}} & r_{n_{12}} & \dots & r_{n_{1i}} \\ r_{n_{21}} & r_{n_{22}} & \dots & r_{n_{2i}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n_{i1}} & r_{n_{i2}} & \dots & r_{n_{ii}} \end{Bmatrix}; S_n = \begin{Bmatrix} s_{n_{11}} & s_{n_{12}} & \dots & s_{n_{1i}} \\ s_{n_{21}} & s_{n_{22}} & \dots & s_{n_{2i}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n_{i1}} & s_{n_{i2}} & \dots & s_{n_{ii}} \end{Bmatrix}; (26)$$

$$(v = 1, 2).$$

Объединяя уравнения (26), окончательно получим

$$(Z_n - TE) W_n = 0, (n = 2, 3, \dots, j), (27)$$

где

$$W_n = \begin{Bmatrix} W_n^{(1)} \\ W_n^{(2)} \end{Bmatrix}; Z_n = \begin{Bmatrix} P_n - R_n & -S_n \\ S_n & P_n - R_n \end{Bmatrix}. (28)$$

Здесь E – единичная матрица. Критическая нагрузка соответствует минимальному собственному числу однородной системы уравнений (27).

В качестве примера определим критическое усилие T для слоистой оболочки, изготовленной из углепластика типа РЗ13 [2]. Радиус оболочки – 0,5 м, длина – 1 м, толщина – 0,002 м. В расчетах варьировалось число слоев k и угол армирования φ . Рассматривались структуры стенки оболочки (см. рис. 2) с $k = 2, 4, 6, 10, 20$. Угол φ изменялся от 0° до 90° . При решении в рядах (20) удерживалось 50 членов по продольной координате и 20 членов по окружной координате (рис. 3).

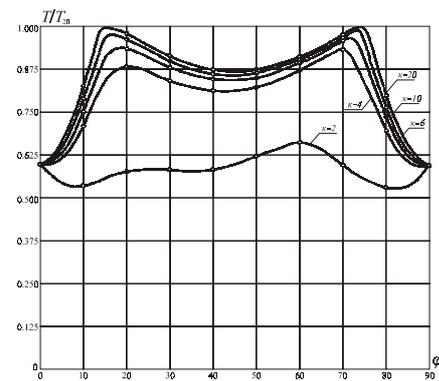


Рис. 3. Изменение величины T/T_{20} (T_{20} – максимальное критическое усилие оболочки с $k = 20$) в зависимости от числа слоев и угла армирования

Число слоев k , а значит, и смешанные жесткости $C_{13}, C_{23}, C_{31}, C_{32}$ оказывают значительное влияние на величину критического усилия. Только при $k = 20$ критическое усилие практически совпадает с критическим уси-

лием, найденными по расчетной модели, в которой структура стенки является ортотропной.

Таким образом, анизотропия стенки оболочки, у которой структура армирования традиционно считается ортотропной, должна, как показал приведенный выше анализ, учитываться при расчете критических усилий.

Библиографический список

1. Васильев, В. В. Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
2. Композиционные материалы: справ. / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др.; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.; ил.

A. V. Lopatin, A. N. Demin

BUCKLING OF AN ANISOTROPIC CYLINDRICAL SHELL LOADED BY AXIAL COMPRESSIVE FORSES

The solution of the buckling problem of a composite cylindrical shell with antisymmetric wall structure loaded by axial compressive forces is presented.

А. В. Лопатин, Л. В. Шумкова

НЕЛИНЕЙНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ОРТОТРОПНОЙ МЕМБРАНЫ, НАТЯНУТОЙ НА ЖЕСТКИЙ КАРКАС

Рассматривается задача о деформировании натянутой на каркас солнечной батареи ортотропной мембраны с расположенными на ней фотоэлементами

Конструкция солнечной батареи космического аппарата (рис. 1) состоит из углепластикового каркаса (рис. 1, а) и натянутой на него ортотропной мембраны, на которой крепятся фотоэлементы (рис. 1, б).

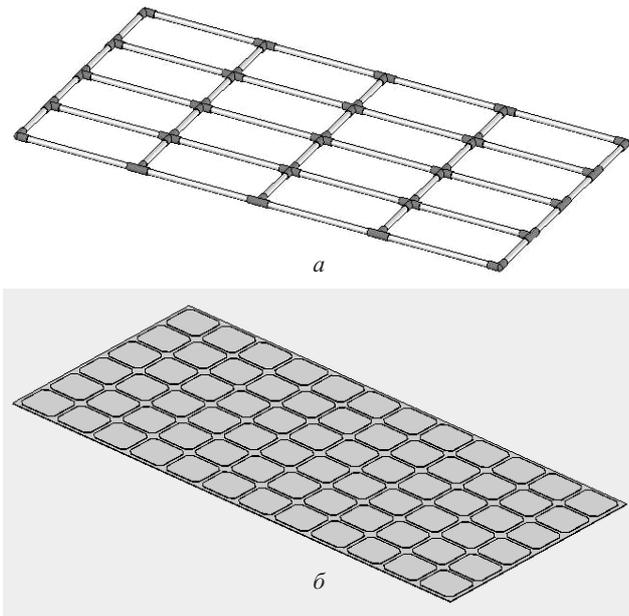


Рис. 1. Солнечная батарея: а – каркас; б – мембрана с фотоэлементами

В процессе сборки на каркас солнечной батареи накладывается мембрана и натягивается по периметру (рис. 2).

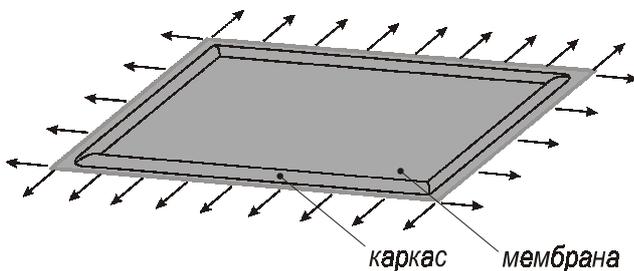


Рис. 2. Натяжение мембраны

После натяжения мембрана закрепляется на каркасе, и к ней крепятся пластины фотоэлементов. При выведении космического аппарата на орбиту, во время раскрытия солнечной батареи на мембрану действует распределенная нагрузка, равная произведению погонного веса фотоэлементов и полотна мембраны на перегрузку. Под действием этой нагрузки мембрана прогибается. При проектировании конструкции солнечной батареи прогиб

мембраны регламентируется. Величина прогиба при заданной нагрузке зависит от усилия натяжения и упругих параметров мембраны.

В работе получено уравнение, связывающее между собой усилие натяжения, действующую нагрузку, геометрические и упругие параметры мембраны и прогиб в центре мембраны. Это уравнение позволяет определять требуемое усилие натяжения при заданном прогибе.

Отнесем плоскость мембраны к системе координат x и y и обозначим через a и b размеры мембраны по осям x и y соответственно (рис. 3).



Рис. 3. Система координат и размеры мембраны

Деформирование ортотропной мембраны описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, которая включает уравнения равновесия:

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$-N_x \chi_x - N_{xy} \chi_{xy} - N_y \chi_y + p = 0,$$

физические соотношения

$$N_x = B_{11} \epsilon_x + B_{12} \epsilon_y + T_x,$$

$$N_y = B_{12} \epsilon_x + B_{22} \epsilon_y + T_y, \quad (2)$$

$$N_{xy} = B_{33} \epsilon_{xy},$$

геометрические соотношения:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2,$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}, \quad (3)$$

$$\chi_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \chi_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \chi_{xy} = -2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.$$

В уравнениях (1), (2), (3) N_x, N_y, N_{xy} – мембранные усилия; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}$ – мембранные деформации; $\chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ – изменение кривизны и кручение плоскости мембраны; u, v – перемещение мембраны по осям x и y соответ-

ственно; w – прогиб мембраны; $B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{33}$ – мембранные жесткости; p – давление, действующее на мембрану; T_x, T_y – усилия натяжения мембраны вдоль осей x и y соответственно.

Получим разрешающую систему уравнений, содержащую в качестве неизвестных перемещения u, v, w . Последовательно подставляя (2) и (3) в (1), получим:

$$\begin{aligned} & B_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B_{33} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (B_{12} + B_{33}) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + B_{11} \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \\ & + (B_{12} + B_{33}) \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + B_{33} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \\ & (B_{12} + B_{33}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + B_{33} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + B_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + B_{33} \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \\ & + (B_{12} + B_{33}) \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + B_{22} \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \\ & B_{11} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + B_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{2} B_{11} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} B_{12} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \\ & + B_{12} \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + B_{22} \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{2} B_{12} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} B_{22} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \\ & + 2B_{33} \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + 2B_{33} \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + 2B_{33} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \\ & + T_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + P = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Удовлетворяя граничным условиям, предполагающим отсутствие перемещений на краях мембраны, представим решение уравнений (4) в следующем виде:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= U \sin \frac{2\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}, \\ v(x, y) &= V \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b}, \\ w(x, y) &= W \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}, \end{aligned} \quad (5)$$

где U, V, W – неизвестные числа, подлежащие определению.

Подставляя (5) в (4) и используя процедуру Бубнова–Галеркина, получим систему нелинейных алгебраических уравнений

$$-a_{11}U - a_{12}V = b_1 W^2, \quad -a_{21}U - a_{22}V = b_2 W^2, \quad (6)$$

$$-c_{11}W + c_{12}UW + c_{21}VW - c_{22}W^3 + p \frac{1536}{\pi^2} = 0. \quad (7)$$

Здесь

$$\begin{aligned} a_{11} &= 9(4B_{11} \frac{\pi^2}{a^2} + B_{33} \frac{\pi^2}{b^2}), \quad a_{12} = a_{21} = 64(B_{12} + B_{33}) \frac{1}{ab}, \\ a_{22} &= 9(4B_{22} \frac{\pi^2}{b^2} + B_{33} \frac{\pi^2}{a^2}), \\ b_1 &= \frac{6}{a} [2B_{11} \frac{\pi^2}{a^2} - (B_{12} - B_{33}) \frac{\pi^2}{b^2}], \\ b_2 &= \frac{6}{b} [2B_{22} \frac{\pi^2}{b^2} - (B_{12} - B_{33}) \frac{\pi^2}{a^2}], \end{aligned} \quad (8)$$

$$c_{11} = 96(T_x \frac{\pi^2}{a^2} + T_y \frac{\pi^2}{b^2}), \quad c_{12} = \frac{128}{\pi} \frac{\pi}{a} [2B_{11} \frac{\pi^2}{a^2} + (2B_{12} + B_{33}) \frac{\pi^2}{b^2}],$$

$$c_{21} = \frac{128}{\pi} \frac{\pi}{b} [2B_{22} \frac{\pi^2}{b^2} + (2B_{12} + B_{33}) \frac{\pi^2}{a^2}],$$

$$c_{22} = 3[3B_{11} \frac{\pi^4}{a^4} + 2(3B_{12} - 2B_{33}) \frac{\pi^2}{a^2} \frac{\pi^2}{b^2} + 3B_{22} \frac{\pi^4}{b^4}].$$

По уравнениям (6) найдем

$$U = -\frac{b_1 a_{22} - b_2 a_{12}}{a_{11} a_{22} - a_{12}^2} W^2, \quad V = -\frac{b_2 a_{11} - b_1 a_{21}}{a_{11} a_{22} - a_{12}^2}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), получим

$$c_{33} W^3 + c_{11} W - p \frac{1536}{\pi^2} = 0, \quad (10)$$

где

$$c_{33} = c_{22} + \frac{b_1(a_{22}c_{12} - a_{21}c_{21}) + b_2(a_{11}c_{21} - a_{12}c_{12})}{a_{11}a_{22} - a_{12}^2}. \quad (11)$$

Кубическое уравнение (10) является основным для рассматриваемой задачи. Оно связывает между собой усилия натяжения T_x, T_y , действующую нагрузку p , размеры мембраны a, b , упругие параметры $B_{11}, B_{12}, B_{22}, B_{33}$ и прогиб в центре мембраны W . Рассмотрим некоторые варианты использования этого уравнения:

– заданы упругие и геометрические параметры мембраны, усилия натяжения и давление. По уравнению (10) определяется прогиб W . Затем, используя уравнения (9), находятся величины U и V . Равенства (5) задают распределения перемещений по поверхности мембраны. При необходимости, используя уравнения (2) и (3), можно определить мембранные усилия;

– заданы упругие и геометрические параметры мембраны, давление и требуемый прогиб. По уравнению (10) можно найти усилие натяжения, обеспечивающее регламентируемый прогиб.

Сделаем здесь одно замечание. Уравнение (10) получено в предположении, что перемещения мембраны могут быть с достаточной точностью представлены одним членом двойного тригонометрического ряда (5). Это допущение может считаться справедливым для несильно вытянутых мембран. Для солнечных батарей каркас проектируется таким образом, что отношение a/b не превышает 2. Поэтому уравнение (10) вполне может быть использовано для определения параметров напряженно-деформируемого состояния мембраны, особенно на этапе проектных расчетов.

В качестве примера получим разрешающее уравнение (10) для изотропной квадратной мембраны, растянутой по контуру одинаковым усилием. Для такой мембраны

$$a = b, \quad T_x = T_y = T, \quad B_{11} = B_{22} = B, \quad B_{12} = B\mu, \quad (12)$$

$$B_{33} = \frac{1-\mu}{2} B, \quad B = \frac{E}{1-\mu^2} h,$$

где T – усилие натяжения; h – толщина мембраны; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона материала мембраны. Подставляя (12) в (8) и (11), после некоторых преобразований получим разрешающее уравнение (10) в следующем виде:

$$Eh \frac{\pi^4}{a^4} f W^3 + \frac{1}{2} T \frac{\pi^2}{a^2} W - p \frac{4}{\pi^2} = 0, \quad (13)$$

где $f = \frac{1}{1-\mu^2} \left(\frac{4(2+2\mu+\tau)(2-\mu+\tau)}{9\pi^2(4+\tau)+64(\mu+\tau)} \right) + \frac{3}{64} (1+\mu - \frac{2}{3}\tau)$; $\tau = \frac{1-\mu}{2}$.

Преобразуем уравнение (13) к безразмерному виду. Для этого введем в рассмотрение новую функцию – безразмерный прогиб

$$z = \frac{W}{h}. \quad (14)$$

Подставляя (14) в (13), получим кубическое уравнение

$$z^3 + \frac{1}{2\pi^2 f} \frac{\sigma}{E} \frac{a^2}{h^2} z - \frac{4}{\pi^6 f} \frac{p}{E} \frac{a^4}{h^4} = 0, \quad (15)$$

где $\sigma = T/h$ – напряжение натяжения мембраны. По уравнению (15) следует, что безразмерный прогиб z зависит от трех величин: σ/E , p/E и a/h .

Представим изменение безразмерного прогиба z в зависимости от аргументов p/E и σ/E (рис. 4). Расчет выполнен для $a/h = 1000$.

Зависимость $z(p/E, \sigma/E)$ носит нелинейный характер. По мере роста усилия натяжения влияние давления уменьшается. Отметим, что эта особенность поведения прогиба сохраняется и для ортотропной мембраны.

Таким образом, решена задача о деформировании ортотропной мембраны, натянутой на жесткий каркас. Полученные результаты могут найти применение при проектировании солнечных батарей космических аппаратов.

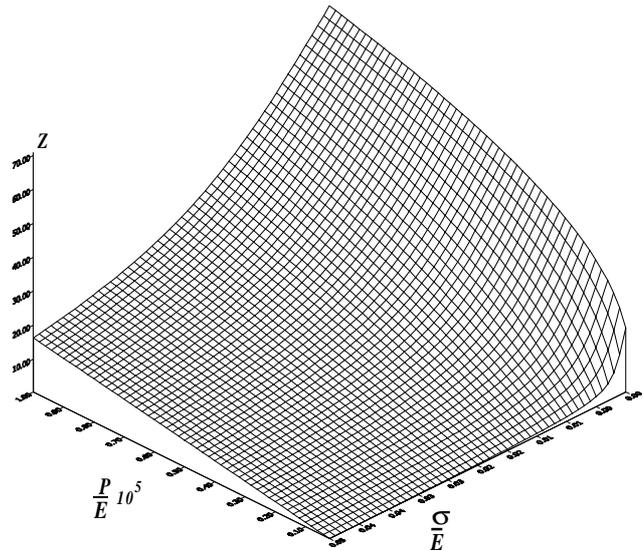


Рис. 4. Изменение безразмерного прогиба

A. V. Lopatin, L. V. Shumkova

NONLINERIAN DEFORMATION OF AN ORTHOTROPIC MEMBRANE STRETCHED ON THE FRAME

The problem of the deformation of an orthotropic membrane stretched on a frame of the solar battery is presented.

П. К. Лопатин

КОМПЬЮТЕРНАЯ ИМИТАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СЕМИЗВЕННЫМ МАНИПУЛЯЦИОННЫМ РОБОТОМ В СРЕДЕ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

Представлен алгоритм управления манипуляторами в среде с неизвестными препятствиями. Приведены результаты компьютерной имитации движения семизвеного манипулятора в неизвестной среде на основе данного алгоритма.

В настоящее время манипуляционные роботы применяются в самых различных областях человеческой деятельности, в том числе при обслуживании парализованных пациентов. Так, например, робототехническая группа Института автоматизирующей техники (ИАТ) Бременского университета работает над проектом «Friend» [15], целью которого является разработка автономного инвалидного кресла, обслуживающего парализованных пациентов или пациентов, находящихся на излечении. Это кресло в качестве составной части имеет стол, на котором располагаются предметы, нужные пользователю. К основанию стола крепится манипулятор с семью степенями подвижности (рис. 1). Пользователь может попросить подать ему воды, и манипулятор должен передвинуться среди предметов, расположенных на столе (стаканов, бутылок, яблок и т. д.), взять бутылку, налить воды в стакан, вставить в него трубочку и подать пользователю.

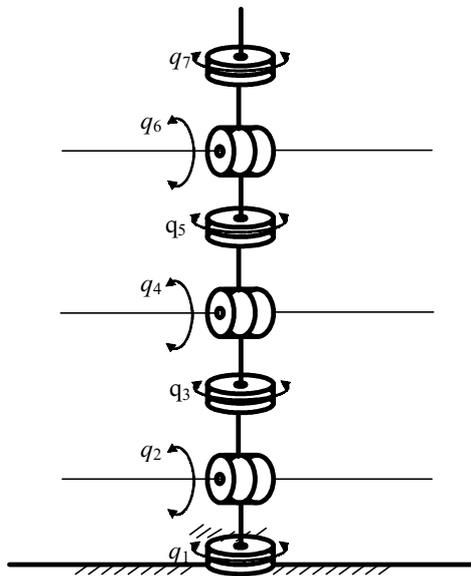


Рис. 1

Такая практическая задача порождает фундаментальную теоретическую задачу – разработку алгоритма, который за конечное число шагов передвинет бы манипулятор из стартовой конфигурации в целевую, при этом в рабочей зоне манипулятора могут находиться препятствия, но их расположение, размеры, форма и количество не известны до начала движения. Предполагается, что расположение, размеры, форма и количество препятствий не будут меняться в течение всего времени движения манипулятора. Сенсорная система манипулятора

может получать информацию о расположении препятствий только из небольшой окрестности той конфигурации, в которой манипулятор находится.

Обозначим стартовую конфигурацию как $\mathbf{q}^0 = (q_1^0, q_2^0, \dots, q_n^0)$, а целевую конфигурацию – как $\mathbf{q}^T = (q_1^T, q_2^T, \dots, q_n^T)$. Если манипулятор, находясь в некоторой конфигурации \mathbf{q} , имеет хотя бы одну общую точку с хотя бы одним препятствием, то такую конфигурацию будем считать запрещенной и точка \mathbf{q} , описывающая эту конфигурацию в пространстве конфигураций, также будет считаться запрещенной. Если манипулятор, находясь в некоторой конфигурации \mathbf{q} , не имеет ни одной общей точки ни с одним препятствием, то такая конфигурация будет считаться разрешенной и точка \mathbf{q} , описывающая эту конфигурацию в пространстве конфигураций, также будет считаться разрешенной. Итак, запрещенные конфигурации будут представлять в пространстве конфигураций как точки, но до начала движения манипулятора у системы управления нет информации об этих точках.

Мы должны также учитывать, что вследствие конструктивных ограничений исполненная траектория должна удовлетворять неравенству

$$\mathbf{a}^1 \leq \mathbf{q}(t) \leq \mathbf{a}^2 \quad (1)$$

для каждого момента времени t движения, где \mathbf{a}^1 – вектор нижних ограничений на значения обобщенных координат; \mathbf{a}^2 – вектор верхних ограничений. Точки, удовлетворяющие неравенству (1), образуют гиперпараллелепипед в пространстве обобщенных координат. Все точки из пространства обобщенных координат, которые не удовлетворяют неравенствам (1), будут квалифицироваться нами также как запрещенные.

Итак, в нашей задаче манипулятор будет представлен как точка, которая должна будет передвинуться во внутренней области гиперпараллелепипеда (1) из точки \mathbf{q}^0 в точку \mathbf{q}^T и траектория движения нашей точки не должна будет налегать на запрещенные точки, которые присутствуют внутри гиперпараллелепипеда (1).

К настоящему времени разработано большое количество алгоритмов управления роботами в известной среде [5; 12]. Предложены алгоритмы, гарантирующие нахождение траектории в среде с известными препятствиями при условии, что такая траектория существует [7...9]. Некоторые алгоритмы, посвященные планированию движения в известной среде, могут быть использованы и для планирования движения в неизвестной среде.

Для решения этой задачи могут применяться различные поисковые алгоритмы, описанные в [12; 16]. Однако эти алгоритмы требуют большого количества механических

ких перемещений, что делает крайне затруднительным их практическое применение [3]. Известно также, что алгоритмы поиска в глубину не всегда доводят до цели [3].

Для решения нашей задачи может быть использован подход, основанный на автоматическом доказательстве теорем [4], но этот подход требует рассмотрения большого количества вариантов и направлений поиска и поэтому применение этого подхода оказывается неэффективным [2].

Некоторые авторы предлагают использовать методы искусственных потенциалов (см., например, [6]). В этом методе робот представляется в виде заряженной точки, препятствия наделяются отталкивающими потенциалами, а целевая точка – притягивающим потенциалом. Работа метода демонстрируется для известных препятствий, но не указывается, как распоряжаться поступающей информацией об обнаружении ранее неизвестных препятствий. В общем случае нет гарантии того, что траектория, свободная от столкновений, будет найдена [5].

Для методов планирования траектории в среде с наперед известными запрещенными состояниями имеется одна общая трудность: очень трудно заранее собрать полную информацию о расположении препятствий в рабочей зоне манипулятора и представить эту информацию в виде, пригодном для учета при планировании траектории манипулятора. В нашем случае можно будет видеть, что не требуется собирать полную информацию о препятствиях в рабочей зоне манипулятора заранее, манипулятор будет собирать необходимую информацию самостоятельно в ограниченных объемах и в терминах обобщенных координат, что удобно для планирования траектории.

Что касается разработки алгоритмов управления роботами в среде с неизвестными препятствиями, то пока предпринимаются попытки их разработки в основном только для двумерных случаев [14].

Существует алгоритм управления манипуляторами среди неизвестных препятствий, расположенных в трехмерном декартовом пространстве [14]. Манипулятор в этом случае должен иметь не более трех звеньев и последняя кинематическая пара должна быть поступательной. При таких предварительных условиях алгоритм гарантирует достижение цели за конечное число шагов.

В [17] рассмотрен n -мерный случай. Но алгоритм основан на решении системы нелинейных уравнений методом Ньютона и поэтому не может гарантировать достижения цели, так как метод Ньютона не гарантирует нахождения решения.

Постановка задачи и предварительные условия. Рассмотрим задачу управления манипулятором в среде с неизвестными препятствиями в следующей постановке: даны стартовая конфигурация q^0 и целевая конфигурация q^T , в рабочей зоне манипулятора препятствия могут присутствовать, но перед началом движения у системы управления манипулятором нет информации о наличии препятствий, их количестве, расположении и форме. Требуется сделать так, чтобы манипулятор передвинулся из конфигурации q^0 в конфигурацию q^T .

Сделаем следующие допущения:

– расположение, формы, размеры и количество препятствий остаются неизменными в течение всего времени движения манипулятора;

– заранее известно, что целевая конфигурация достижима, т. е. известно, что в пространстве обобщенных координат можно найти хотя бы одну линию, соединяющую q^0 и q^T и эта линия не налагает ни на одну запрещенную точку, находящуюся во внутренней области гиперпараллелепипеда (1);

– результирующая траектория должна удовлетворять неравенству (1) для каждого момента времени, т. е. все движение должно происходить в гиперпараллелепипеде (1);

– манипулятор имеет сенсорную систему, которая при нахождении манипулятора в некоторой конфигурации q , принадлежащей гиперпараллелепипеду (1), позволяет отвечать на вопрос относительно каждой конфигурации, принадлежащей небольшой r -окрестности конфигурации q : налагает ли конфигурация из этой r -окрестности на препятствия или нет? Эта окрестность конфигурации q есть гипершар в пространстве конфигураций с центром в q и радиусом $r > 0$. Устройство сенсорной системы здесь не рассматривается;

– обозначим множество всех конфигураций из r -окрестности точки q через $Y(q)$. Множество всех запрещенных точек из $Y(q)$ обозначим как $Q(q)$, множество всех разрешенных точек из $Y(q)$ – как $Z(q)$ (рис. 2).

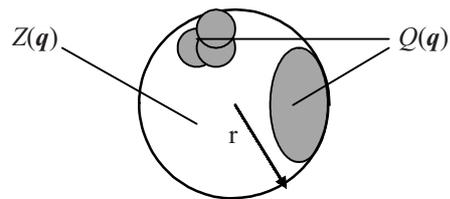


Рис. 2

Алгоритм управления манипуляторами в неизвестной среде. На кафедре информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева разработан наиболее общий подход к решению задачи управления манипуляционными роботами в среде с неизвестными препятствиями. Решена задача планирования движения n -звенного манипулятора из стартовой конфигурации в целевую, при этом используется информация только из небольшой окрестности текущего положения манипулятора с тем, чтобы манипулятор достиг целевой конфигурации за конечное число шагов.

Имеется алгоритм для движения n -звенного манипулятора в среде с неизвестными препятствиями, который гарантирует достижение целевой конфигурации за конечное число шагов в среде, заполненной произвольным числом статических препятствий, которые имеют произвольные формы, размеры и расположение [13]. Предполагается, что целевая конфигурация достижима. Назовем этот алгоритм базовым.

В работах [1; 3; 13] приведены эвристические алгоритмы, которые, хотя и не гарантируют достижения целевой конфигурации, но при тестировании продемонстрируют высокую работоспособность.

Рассмотрим эвристический алгоритм А3 (далее будем называть его просто алгоритм) управления манипуляторами в среде с неизвестными препятствиями [3; 13]. В алгоритме q^n означает текущую конфигурацию манипулятора.

Перед началом работы алгоритма мы открываем стек, в котором будем хранить конфигурации, в которых манипулятор менял свою траекторию. Количество конфигураций, находящихся в настоящее время в стеке, обозначаем через J . Перед началом работы алгоритма стек пуст и $J=0$.

Шаг 1. Считается, что манипулятор находится в стартовой конфигурации q^0 : $n=0, J=0$.

Шаг 2. Если целевая конфигурация q^T достигнута, то алгоритм заканчивает работу. В противном случае рассчитать траекторию $q^n q^T$, соединяющую q^n и q^T . Траектория $q^n q^T$ представляет собой конечное множество точек, лежащих на отрезке прямой линии, соединяющем q^n и q^T . Запомнить число точек, образующих $q^n q^T$ в переменной $number_of_points$.

Шаг 3. Сформировать множества $Y(q^n), Q(q^n), Z(q^n)$.

Шаг 4. Если в отрезке $q^n q^T$ нет ни одной точки, которая совпадает хотя бы с одной точкой из $\cup Q(q^i), i=0, 1, \dots, n$, то тогда манипулятор двигается в следующую точку $q^n q^T$, n увеличивается на 1, а алгоритм переходит на шаг 5. В противном случае алгоритм переходит на шаг 7.

Шаг 5. Если $n=1$, опустошить стек и считать $J=0$.

Шаг 6. Если $n \geq number_of_points$, то алгоритм переходит на шаг 3. В противном случае алгоритм переходит на шаг 2.

Шаг 7. Добавить q^n в стек, увеличить J на 1. Выбрать $q \in Z(q^n)$ в соответствии с алгоритмом отталкивания от предыстории (АОП) (см. ниже). Манипулятор передвигается в q , n увеличивается на 1. Обозначить q через q^n . Алгоритм переходит на шаг 2.

Заметим, что на шаге 5 мы опустошаем стек, потому что n стало равным 1. Это означает, что манипулятор начал двигаться по спланированному маршруту. Мы рассматриваем это как признак выхода манипулятора из тупика.

В алгоритме предварительная траектория выбирается в виде отрезка прямой линии в пространстве обобщенных координат. Это существенно упрощает расчет предварительной траектории, хотя одновременно ведет к тому, что достижение цели не гарантируется. Поэтому алгоритм, приведенный выше, можно дополнить следующим условием: если шаг 7 был выполнен N_7 раз подряд, то в качестве предварительной траектории должна быть выбрана линия более высокого порядка, которая смогла бы обойти запрещенные точки.

Рассмотрим теперь алгоритм отталкивания от предыстории. Он используется для упрощения выхода из тупика, который может возникнуть в r -окрестности текущей конфигурации.

Алгоритм отталкивания от предыстории основан на следующем эвристическом подходе. В случае если на шаге 4 мы обнаруживаем, что $q^n q^T$ пересекается с $\cup Q(q^i), i=0, 1, \dots, n$, это означает, что манипулятор должен двигаться не в следующую точку $q^n q^T$, а в другую точку $q \in Z(q^n)$. В стеке мы храним точки смены траектории манипулятора, около которых были обнаружены препятствия. Поэтому мы должны выбрать такую точку из множества $Z(q^n)$, которая лежит как можно дальше от точек из стека и как можно ближе к q^T . Перед работой АОП запишем в переменную $number_of_configurations$ число конфигураций в $Z(q^n)$. Число J , как и прежде, есть число конфигураций в стеке. АОП выглядит следующим образом:

Шаг 1. Считать $j=1$.

Шаг 2. Если $j > J$, то перейти на шаг 4. В противном случае рассмотреть q^j из стека.

Шаг 3. Вызвать алгоритм 1 (см. ниже) и получить от него модифицированное $Z(q^n)$ и количество конфигураций в нем в переменной $number_of_configurations$. Увеличить j на 1. Перейти на шаг 2.

Шаг 4. Выбрать из $Z(q^n)$ такую конфигурацию q , чье расстояние до q^T наименьшее по сравнению с другими конфигурациями из $Z(q^n)$.

Алгоритм 1. Этот алгоритм получает от вызвавшей процедуры множество $Z(q^n)$, переменную $number_of_configurations$, q^j и q^n и оставляет в $Z(q^n)$ те конфигурации, чье расстояние до q^j больше, чем расстояние между q^j и q^n . По окончании своей работы алгоритм 1 возвращает в вызвавшую процедуру модифицированное множество $Z(q^n)$ и переменную $number_of_configurations$. Если при завершении своей работы алгоритм 1 обнаруживает, что он выбросил из $Z(q^n)$ все конфигурации, то он возвращает $Z(q^n)$ и $number_of_configurations$ в то состояние, которое они имели на момент вызова алгоритма 1.

Результаты применения алгоритма. В ходе стажировки автора в Бременском университете на основе алгоритма было разработано программное обеспечение, имитирующее на ЭВМ движение манипулятора в среде с неизвестными препятствиями. Работа созданного программного обеспечения испытывалась для упомянутого в начале статьи семизвенного манипулятора.

Первоначально пользователь разработанного программного обеспечения создает рабочую сцену с помощью программы, разработанной в ИАТ [10].

Пользователь вводит типы, размеры и количество препятствий. Препятствия представляются параллелепипедами. Каждый параллелепипед характеризуется девятью величинами: координатами начала O координатной системы $x_{obst}, y_{obst}, z_{obst}$, связанной с препятствием, в базовой координатной системе x_0, y_0, z_0 (рис. 3); углами Roll, Pitch, Yaw, характеризующими ориентацию препятствия по отношению к базовой координатной системе; длиной, шириной и высотой препятствия. Звенья манипулятора также считаются параллелепипедами.

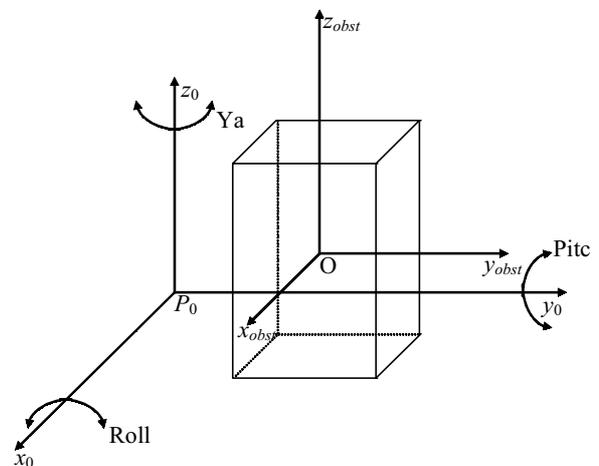


Рис. 3

После создания рабочей зоны пользователь вводит векторы q^0 , описывающий стартовую конфигурацию, и q^T , описывающий целевую конфигурацию. Каждый вектор

состоит из семи обобщенных координат, величина каждой координаты вводится в радианах. После этого программное обеспечение демонстрирует движение манипулятора среди неизвестных препятствий.

Мы провели эксперименты для различного числа и расположения препятствий, разных стартовых и целевых конфигураций. Результаты некоторых экспериментов приведены в таблице. Движение манипулятора в ходе эк-

сперимента 4 показано на рис. 4. Заметим, что в экспериментах 1...4 стартовая и целевая конфигурации остаются одинаковыми, но в каждый новый эксперимент мы добавляли по одному препятствию: в эксперименте 1 рабочая сцена такая же, как и в эксперименте 4, но препятствия 3, 4, 5 отсутствуют; в эксперименте 2 нет препятствий 4 и 5; в эксперименте 3 отсутствует препятствие 5 (четвертым препятствием на рис. 4, а является пол).

№ эксперимента	q^0 , рад	q^T , рад	Характеристики препятствий										t, с
			№	x_0^0 , см	y_0^0 , см	z_0^0 , см	Roll рад	Pitch, рад	Yaw, рад	Длина, см	Ширина, см	Высота, см	
1	1,57; 1,57; 0; -1,57; 0; -1,57; 0	-1,57; 1,57; 0; 0; 0; 0	1	0	2	8	0	0	0	80	1,6	2	720
			2	20	-10	0	0	0	0	34	14	20	
2	1,57; 1,57; 0; -1,57; 0; -1,57; 0	-1,57; 1,57; 0; 0; 0; 0	1	0	2	8	0	0	0	80	01.июн	2	1050
			2	20	-10	0	0	0	0	34	14	20	
			3	-24	-10	0	0	0	0	34	14	40	
3	1,57; 1,57; 0; -1,57; 0; -1,57; 0	-1,57; 1,57; 0; 0; 0; 0	1	0	2	8	0	0	0	80	01.январь	2	867
			2	20	-10	0	0	0	0	34	14	20	
			3	-24	-10	0	0	0	0	34	14	40	
			4	-40	-40	-0.2	0	0	0	200	200	0.2	
4	1,57; 1,57; 0; -1,57; 0; -1,57; 0	-1,57; 1,57; 0; 0; 0; 0	1	0	2	8	0	0	0	80	1,6	2	890
			2	20	-10	0	0	0	0	34	14	20	
			3	-24	-10	0	0	0	0	34	14	40	
			4	-40	-40	-0.2	0	0	0	200	200	0.2	
			5	-6	8	0	0	0	0	2	2	40	

Прокомментируем рис. 4. Стартовая конфигурация q^0 показана на рис. 4, а, целевая конфигурация q^T – на рис. 4, з. Манипулятор генерирует траекторию в соответствии с шагом 2 алгоритма, т. е. генерирует конечное множество точек, лежащих на отрезке прямой линии, соединяющем q^0 и q^T в пространстве обобщенных координат. После этого манипулятор начинает двигаться по данной траектории. Момент, когда манипулятор встретил препятствие 1, представлен на рис. 4, б. С помощью АОП манипулятор обходит препятствие и переходит в конфигурацию, показанную на рис. 4, в. После этого манипулятор пытается двигаться в направлении q^T , но встречает препятствие 2. Манипулятор вновь использует АОП, который перемещает манипулятор в соседнюю конфигурацию.

Заметим, что всякий раз после того как манипулятор передвинулся в конфигурацию, выбранную по АОП, он планирует новую траекторию, ведущую в q^T , и пытается ее осуществить. Но и в следующей конфигурации предварительного маршрута манипулятор наталкивается на

препятствие (сенсорная система дает информацию о разрешенных и запрещенных конфигурациях только в пределах небольшого радиуса вокруг текущей конфигурации). Поэтому в течение определенного промежутка времени манипулятор сталкивается с препятствием.

Наконец АОП переводит манипулятор в конфигурацию, показанную на рис. 4, з, т. е. манипулятор начинает двигаться вверх. Вспомним, что АОП выбирает ту конфигурацию, которая лежит как можно дальше от конфигураций, выбранных по АОП ранее, и которая лежит как можно ближе к q^T . С момента, показанного на рис. 4, з, использование АОП заставляет манипулятор двигаться вниз. Этот процесс приводит манипулятор в конфигурацию, в которой он сталкивается с полом, т. е. препятствием 4 (рис. 4, д). Теперь АОП вновь начал перемещать манипулятор вверх, но уже из конфигурации, показанной на рис. 4, д. В течение этого движения манипулятор приходит в конфигурацию, показанную на рис. 4, е, которая выглядит похожей на конфигурацию, показанную на рис. 4, д, однако из-за разницы в

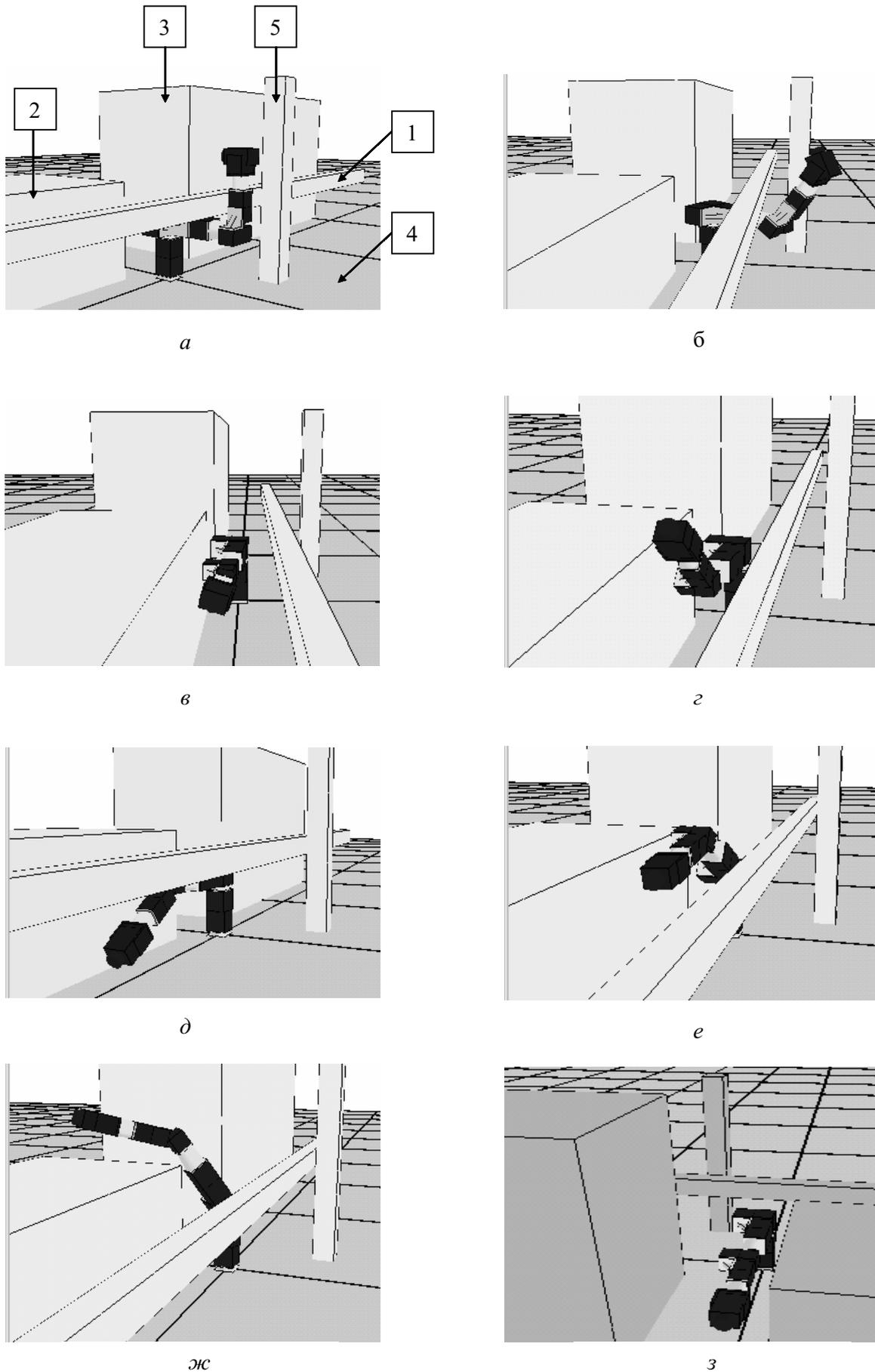


Рис. 4

значении угла q_4 эти конфигурации выглядят по-разному: значение q_4 в конфигурации, показанной на рис. 4, *е*, позволяет АОП выбрать такую конфигурацию, которая находится выше по предыдущей. Наконец манипулятор переходит в конфигурацию, показанную на рис. 4, *ж*. Обращаем внимание на то, что величина q_4 возросла (и это показывает, что для момента, показанного на рис. 4, *е*, АОП имел возможность найти свободные конфигурации с более большими значениями q_4). В заключение манипулятор обходит препятствия и приходит в целевую конфигурацию q^T (рис. 4, *з*).

Программное обеспечение для управления семизвенным манипулятором в среде с неизвестными препятствиями было разработано с использованием Microsoft Visual C++ 6.0 и его работа испытывалась на процессоре Intel Pentium II 2.4 GHz.

Таким образом, представлен эвристический алгоритм управления манипуляторами в среде с неизвестными статическими препятствиями. На основе данного алгоритма разработано программное обеспечение, имитирующее на ЭВМ движение манипуляторов. Представлены результаты тестирования этого программного обеспечения на примере управления семизвенным манипулятором в среде с неизвестными препятствиями. Продемонстрирована высокая работоспособность данного алгоритма.

Библиографический список

1. Бернацкий, И. П. Исследование интеллектуальных систем управления манипуляционными роботами в неизвестных экстремальных средах: отчет о НИР (заключ.) / И. П. Бернацкий, П. К. Лопатин; НИИ СУВПТ. Красноярск, 2000.
2. Ефимов, Е. И. Проблема перебора в искусственном интеллекте / Е. И. Ефимов // Изв. АН СССР. Сер: «Тех. кибернетика». 1988. № 2. С. 127–128.
3. Ильин, В. А. Интеллектуальные роботы: теория и алгоритмы / В. А. Ильин; САА. Красноярск, 1995.
4. Тимофеев, А. В. Роботы и искусственный интеллект / А. В. Тимофеев. М.: Наука, 1978.
5. Ahrikhencheikh, C. Optimized-Motion Planning: Theory And Implementation / C. Ahrikhencheikh, A. Seireg. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1994.

6. Barraquand, J. Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach / J. Barraquand, J.-C. Latombe // Int. J. of Rob. Res. Vol. 10. 1991. № 6. P. 628–649.

7. Canny, J. The Complexity Of Robot Motion Planning / J. Canny. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1988.

8. Collins, G. E. Quantifier Elimination For Real Closed Fields By Cylindrical Algebraic Decomposition / G. E. Collins // Lecture Notes in Computer Science. Vol. 33. New York: Springer-Verlag, 1975. P. 135–183.

9. Donald, B. R. On Motion Planning with Six Degrees of Freedom: Solving the Intersection Problems in Configuration Space / B. R. Donald // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1985.

10. Feuser, J. Software development for prevention of a robot collision with an environment via mapped virtual reality / J. Feuser, O. Ivlev // 25. Kolloquium der Automatisierungstechnik. Salzhause, Germany, 2003. P. 34–35.

11. Gilbert, E. G. A fast procedure for computing the distance between complex objects in free space / E. G. Gilbert, D. W. Johnson, S. S. Keerthi // IEEE Journal of Robotics and Automation. Vol. 4. 1988. № 2. P. 193–203.

12. LaValle, S. M. Planning Algorithms, 1999–2003 [Electronic resource] / S. M. LaValle. Electronic data. Режим доступа: <http://msl.cs.uiuc.edu/planning>. Загл. с экрана.

13. Lopatin, P. K. Algorithm of a manipulator movement amidst unknown obstacles / P. K. Lopatin // Proceedings of the 10th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2001), August 22–25, 2001, Hotel Mercure Buda, Budapest, Hungary. Budapest, 2001. P. 327–331.

14. Lumelsky, V. J. Three-Dimensional Motion Planning In An Unknown Environment For Robot Arm Manipulators With Revolute Or Sliding Joints / V. J. Lumelsky, K. Sun // International. Journal of Robotics and Automation. Vol. 9. 1994. № 4. P. 188–198.

15. A FRIEND for Assisting Handicapped People / C. Martens, N. Ruchel, O. Lang et al. // IEEE Robotics and Automation Magazine. 2001. Mar. P. 57–65.

16. Nilsson, N. J. Problem-Solving Methods in Artificial Intelligence / N. J. Nilsson. New York: McGraw-Hill Book Company, 1971.

17. Yegenoglu, F. On-line Path Planning Under Uncertainty / F. Yegenoglu, A. M. Erkmen, H. E. Stephanou // Proc. 27th IEEE Conf. Decis. and Contr., Austin, Tex., Dec. 7–9, 1988. Vol. 2. New York, 1988. P. 1075–1079.

P. K. Lopatin

COMPUTER SIMULATION OF A 7DOF MANIPULATOR CONTROL IN UNKNOWN ENVIRONMENT

In this article is presented an algorithm for manipulators' control in an environment with unknown obstacles. Given results of the computer simulation of 7DOF manipulator control in unknown environment based on the presented algorithm.

В. Н. Наговицин

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ СЖАТОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ ЕЕ НАДЕЖНОСТИ

Решается задача оптимизации цилиндрических оболочек из полимерных композиционных материалов с точки зрения их надежности.

Оптимальное проектирование конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является актуальным вопросом в механике деформированного твердого тела. Под оптимальным проектированием принято понимать установление таких характеристик конструкции, несущей заданные нагрузки, при которых она по определенному критерию будет наилучшей из всех возможных вариантов.

Механические характеристики ПКМ, обуславливаемые свойствами компонентов и схемой расположения армирующих волокон, могут изменяться в широких пределах, что позволяет получать оптимальные в весовом отношении конструкции с заранее заданной анизотропией механических свойств, соответствующей характеру действующих нагрузок.

Анализ условий и методов решения задач оптимизации цилиндрических оболочек из полимерных композиционных материалов. В качестве параметров оптимизации принимаются направления армирования волокон, интенсивность армирования в заданном направлении, соотношение арматуры и связующего в ПКМ, геометрические размеры оболочки и т. д.

В зависимости от условий эксплуатации оболочки из ПКМ в качестве критерия оптимизации или физических ограничений могут быть взяты минимальный вес конструкции при условии обеспечения прочности и устойчивости, максимальная надежность конструкции, максимальная жесткость конструкции с учетом фактора времени, максимальная частота первой формы собственных колебаний при динамическом нагружении и другие характеристики и свойства оболочки из ПКМ.

Критерий минимума веса наиболее часто применяется при проектировании конструкций летательных аппаратов. Задача минимизации веса цилиндрической оболочки из ПКМ решается методом нелинейного программирования или методом множителей Лагранжа. Трудности задач оптимального проектирования цилиндрической оболочки из ПКМ состоят в составлении функций ограничений и в сложном виде таких задач.

Расчет оптимальных параметров цилиндрической оболочки из полимерных композиционных материалов, нагруженной осевой сжимающей силой. Ставится задача спроектировать цилиндрическую оболочку из ПКМ так, чтобы оболочка имела наименьший вес G , выдерживая при этом заданную нагрузку N при заданной длине L .

Требуемые механические характеристики и свойства оболочки из ПКМ определяются действием осевого сжимающего усилия N . Так, должно выполняться условие прочности материала. Кроме того, при исследовании несущей способности тонкостенной оболочки, наряду с

прочностью, должна быть обеспечена достаточная устойчивость. Известно, что тонкостенные оболочки под действием критических величин сжимающих напряжений, далеко не достигающих пределов прочности, искривляются и этот процесс заканчивается либо разрушением, либо развитием больших деформаций, нарушающих работу отдельного элемента или всей конструкции. В нашем случае необходимо учитывать возможность как местной потери устойчивости оболочки, так и потери ее устойчивости в целом как трубчатого стержня с кольцевым сечением.

Оптимальная степень наполнения углепластика находится в пределах 57...63 %, что соответствует объемному модулю армирования $\mu = 0,57...0,63$. Этот же результат получен при решении задачи оптимизации цилиндрической оболочки при внешнем давлении и осевом сжатии в работе (рис. 1).

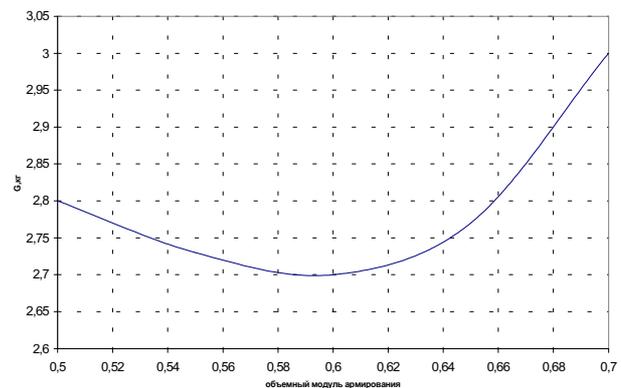


Рис. 1. Зависимость веса сжатой оболочки от объемного модуля армирования ПКМ %

Таким образом, в задаче оптимального проектирования можно принять следующие оптимальные параметры цилиндрической оболочки из ПКМ, работающей в условиях осевого сжатия:

- объемный модуль армирования $\mu = 0,6$;
- армирующие слои направлены под углами $\varphi_0 = 0^\circ$, $\varphi_{45} = \pm 45^\circ$, $\varphi_{90} = 90^\circ$ к продольной оси оболочки;
- коэффициенты армирования соответственно равны $\gamma_0 = 0,75$; $\gamma_{45} = 0,22$; $\gamma_{90} = 0,03$.

Оптимальная анизотропия ПКМ сжатой цилиндрической оболочки, количество элементарных слоев по толщине в котором $m \geq 8$, имеет вид $\frac{m_0}{0} + \frac{m_{45}}{\pm 45} + \frac{m_{90}}{90}$, где m_0 – количество слоев, армированных в продольном направлении, $m_0 = 0,75m = 6, 7, 8, \dots$; m_{45} – количество слоев, армированных под углом $\pm 45^\circ$, $m_{45} = 0,22m = 2, 4, 6, \dots$; m_{90} – количество слоев, армированных в окружном на-

правления, $m_{90} = m - m_0 - m_{45}$. При количестве слоев $m < 8$ оптимальная анизотропия материала имеет вид $\frac{m}{0^\circ}$.

Армирование материала в окружном направлении при $m \leq 30$ обеспечивается только верхним технологическим слоем.

Современные ПКМ обнаруживают разброс прочности и упругих свойств, что приводит к необходимости развития статистических подходов к оценке несущей способности конструкций, изготовленных из этих материалов. Использование статистических методов становится особенно актуальным при проектировании оптимальных конструкций из ПКМ. Проектирование таких конструкций трактуется как проблема обеспечения их надежности при минимальном весе.

Условие неразрушаемости моделей можно записать в виде

$$\bar{k}_0 V(\bar{U}_1, \bar{U}_2, \dots, \bar{U}_r) (1 - Y \cdot v_0)^m = N_0,$$

где $V(\bar{U}_1, \bar{U}_2, \dots, \bar{U}_r)$ – функциональная зависимость расчетной нагрузки от средних значений геометрических характеристик моделей и механических свойств их материала, определенных при испытании образцов; \bar{k}_0 – среднее значение параметра нагрузки, принятого в виде отношения предельной нагрузки, определенной при испытании моделей, к ее расчетной величине; v_0 – коэффициент вариации параметров нагрузки; Y – квантиль надежности, соответствующий заданному уровню надежности; m – коэффициент условий работы, учитывающий изменение предельной нагрузки при воздействии некоторой физической среды; N_0 – эксплуатационная нагрузка. Этот коэффициент принимается в виде произведения отношений нормированных значений параметра нагрузки в фиксированные интервалы времени воздействия среды:

$$m = \prod_{i=1}^t \frac{\bar{k}_0^i (1 - Y \cdot v_0^i)}{\bar{k}_0^{i-1} (1 - Y \cdot v_0^{i-1})},$$

где \bar{k}_0^i, v_0^i – средние значения и коэффициенты вариации параметра нагрузки в i -й момент времени на i -м этапе испытаний; t – общее количество интервалов времени либо этапов испытаний. Особенностью условия неразрушаемости является то, что все случайные свойства моделей сведены к одному обобщенному параметру нагрузки, благодаря чему значительно облегчается решение ряда практических задач, связанных с выбором расчетной зависимости, определением коэффициента безопасности и оценкой надежности.

Анализ разброса параметра нагрузки позволяет определить коэффициент безопасности при заданной надежности

$$f = \frac{1}{1 - Y \cdot v_0} \prod_{i=1}^t \frac{(1 - Y \cdot v_0^{i-1})}{(1 - Y \cdot v_0^i)},$$

который в общем случае отличается от нормативного коэффициента безопасности f_n , или надежность конструкции (соответствующий квантиль надежности) при заданном нормативном коэффициенте безопасности:

$$Y_i = \frac{1}{v_0^i} \left(1 - \frac{1}{f_n} \right).$$

Сформулируем задачу оптимизации следующим образом: необходимо выбрать такие толщину оболочки h и радиус поверхности R , чтобы при заданной длине L и за-

данной нагрузке N с вероятностью не менее β оболочка имела наименьший вес $G(\bar{x})$.

Задача оптимального проектирования с учетом надежности конструкции сводится к нахождению значений критических усилий при местной $N_0^M(\bar{x})$ и общей $N_0^O(\bar{x})$ потере устойчивости, при разрушении материала $N_0^R(\bar{x})$:

$$\left. \begin{aligned} N_0^M(\bar{x}) &= \bar{k}_0^M \cdot 2\pi \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot (1 - Y \cdot v_0^M) \\ N_0^O(\bar{x}) &= \bar{k}_0^O \cdot \pi \cdot L^2 \cdot h \cdot R^3 \cdot E_1 \cdot (1 - Y \cdot v_0^O) \\ N_0^R(\bar{x}) &= \bar{k}_0^R \cdot 2\pi \cdot R \cdot h \cdot \sigma_1 \cdot (1 - Y \cdot v_0^R) \end{aligned} \right\},$$

где \bar{k}_0^M, v_0^M – среднее значение и коэффициент вариации параметра нагрузки при местной потере устойчивости оболочки; \bar{k}_0^O, v_0^O – среднее значение и коэффициент вариации параметра нагрузки при общей потере устойчивости оболочки; \bar{k}_0^R, v_0^R – среднее значение и коэффициент вариации параметра нагрузки при разрушении материала; Y – квантиль надежности, соответствующий вероятности β .

Задачу оптимального проектирования будем решать методом множителей Лагранжа.

В целевой функции введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} A &= 2\pi \cdot \gamma \cdot L, \\ B &= \pi^3 \cdot L^2 \cdot E_1 \cdot \bar{k}_0^O (1 - Y \cdot v_0^O), \\ C &= 2\pi \cdot \sigma_1 \cdot \bar{k}_0^R (1 - Y \cdot v_0^R), \\ D &= 2\pi \cdot \alpha \cdot \bar{k}_0^M (1 - Y \cdot v_0^M) \end{aligned} \right\}$$

Формула для критической длины оболочки запишется следующим образом:

$$L' = \sqrt{\frac{\pi \cdot \alpha \cdot E_1 \cdot N [\bar{k}_0^O (1 - Y \cdot v_0^O)] \cdot [\bar{k}_0^M \cdot (1 - Y \cdot v_0^M)]}{4 \cdot \sigma_1^3 \cdot [\bar{k}_0^R \cdot (1 - Y \cdot v_0^R)]^2}}.$$

Оптимальные размеры h, R цилиндрической оболочки, выдерживающей осевую нагрузку N с вероятностью не менее β при заданной длине оболочки L , имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} & \text{– если заданная длина оболочки } L = L', \text{ то } h = \sqrt{\frac{N}{D}}, \\ R &= \frac{\sqrt{N \cdot D'}}{C'}; \\ & \text{– если заданная длина оболочки } L > L', \text{ то } h = \sqrt{\frac{N}{D}}, \\ R &= \sqrt{\frac{N \cdot D'}{(B')^2}}; \end{aligned}$$

– при $L < L'$ размеры h и R могут принимать любые значения, удовлетворяющие уравнению $h \cdot R = \frac{N}{C'}$, причем толщина h и радиус срединной поверхности оболочки R ограничены следующими значениями:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{N}{D'}} &\leq h \leq \frac{N}{C'} \cdot \sqrt{\frac{B'}{C'}}, \\ \sqrt{\frac{C'}{B'}} &\leq R \leq \frac{\sqrt{N \cdot D'}}{C'}. \end{aligned}$$

Средние значения и коэффициенты вариации параметра нагрузки при местной \bar{k}_0^M, v_0^M и общей \bar{k}_0^O, v_0^O потере устойчивости оболочки, при разрушении ПКМ \bar{k}_0^R, v_0^R были определены по результатам испытаний на прочность и устойчивость трубчатых стержней из углепластика КМУ-3Л. Испытания проводились на стержнях длиной 100, 225 и 650 мм, средним диаметром от 30,6 до 32 мм и толщиной от 0,4 до 1,5 мм (рис 2...4).

Полученные средние значения и коэффициенты вариации параметра нагрузки при местной \bar{k}_0^M, v_0^M и общей \bar{k}_0^O, v_0^O потере устойчивости, при разрушении материала

стержней \bar{k}_0^R, ν_0^R подчиняются нормальному закону распределения и соответственно равны

$$k_0^M = 0,60, \quad \nu_0^M = 0,08, \\ k_0^D = 0,88, \quad \nu_0^D = 0,10,$$

Таким образом, полученные выше формулы могут быть использованы для расчета оптимальных размеров, несущей способности и характера ее потери сжатыми стержнями из ПКМ при соотношении $4 \leq L/R \leq 45$.

Размеры и несущая способность стержней с другими параметрами могут быть пересчитаны в соответствии с критериями подобия.



Рис. 2. Общая потеря устойчивости трубы

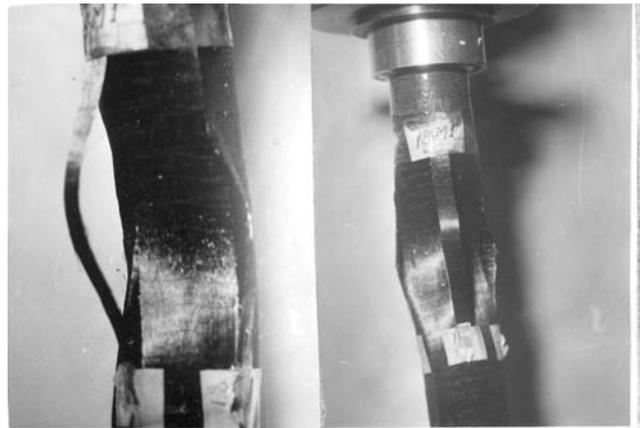


Рис. 3. Характер местной потери устойчивости трубы

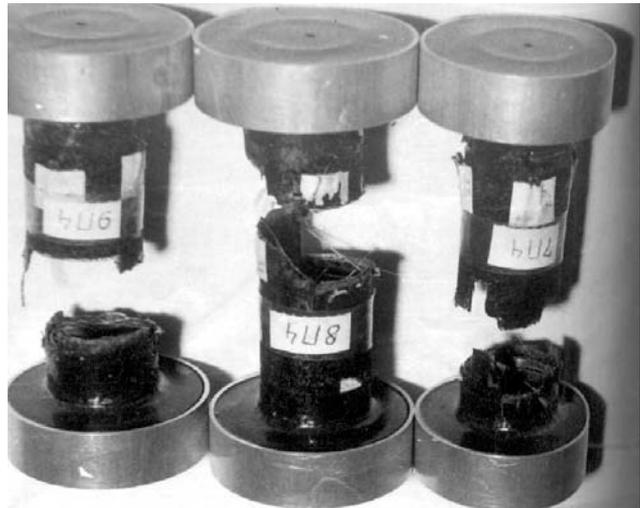


Рис. 4. Характер прочностного разрушения труб от действия осевой сжимающей силы

V. N. Nagovizin

TASK OF THE OPTIMIZATION OF CABINES CYLINDRICAL CAPSULE WITH ALLOWANCE FOR ITS RELIABILITY

Is decided the task of the optimization of cylindrical capsules from polymer composite materials with allowance for their reliability.

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Предложены схема и алгоритмы управления дискретно-непрерывными процессами. Рассмотрены модификации алгоритмов, учитывающие взаимодействие с лицом, принимающим решение, наличие вещественных, целочисленных и булевых переменных.

Рассмотрим задачу управления дискретно-непрерывным процессом, входные и выходные характеристики которого имеют вид вещественных, целочисленных и булевых переменных (см. рисунок).

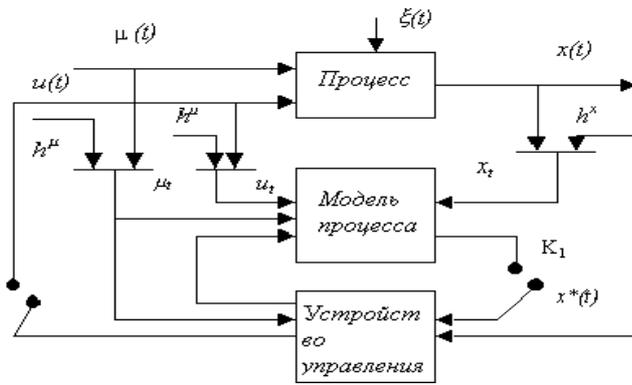


Схема управления процессом

На рисунке приняты следующие обозначения: $x(t) = (x^1(t), \dots, x^k(t))$ – вектор выходных переменных процесса; $u(t) = (u^1(t), \dots, u^m(t))$ и $\mu(t) = (\mu_1(t), \dots, \mu_n(t))$ – соответственно управляемые и неуправляемые контролируемые переменные, состоящие из m и n компонентов; $\xi(t)$ – случайные возмущения; h^u, h^u, h^x – случайные ошибки измерения, такие что $M\{h\} = 0, D\{h\} < \infty$; $x^*(t)$ – желаемое значение выходной переменной, t – время.

На первом этапе (ключ K_1 разомкнут) решается задача идентификации; на втором этапе (ключ K_1 замкнут) решается задача управления объектом с участием лица, принимающего решение (ЛПР), после этого ключ K_2 замыкается.

При управлении дискретно-непрерывными процессами целесообразно использовать теорию адаптивных и обучающихся систем. Задачи идентификации, управления и принятия решения в стохастических системах рассматриваются в условиях непараметрической неопределенности (когда не известна параметрическая структура модели исследуемого процесса), поэтому предлагается использовать регрессионные модели.

Пусть x, u, μ , где t – дискретное время, являются наблюдаемыми переменными. Необходимо найти алгоритм работы управляющего устройства для выработки такого управляющего воздействия на систему, что выход процесса в каждый текущий момент времени ($t = 1, 2, \dots$) как можно меньше отличался бы от желаемого $x^*(t)$.

Для решения задачи управления используем элементы непараметрического подхода [1...3], который предполагает использование непараметрической оценки регрессии в качестве модели истинных зависимостей.

Регрессия (условное математическое ожидание) является оптимальной, в смысле квадратичного критерия

$$R = M \{ (X - \hat{x})^2 | u \} = \min_{\hat{x}} \quad (1)$$

моделью истинных зависимостей. Здесь \hat{x} – оценка вектора выхода объекта X .

Используя необходимое условие минимума, т. е., приравняв производную функции R по искомой величине \hat{x} к нулю, получим $dR / d\hat{x} = -2M \{ (X - \hat{x}) | u \} = 0$, отсюда

$$\hat{x} = M\{X|u\}. \quad (2)$$

Непараметрическая оценка регрессии для векторного случая имеет вид

$$\hat{x}_{s+1}^k = \sum_{i=1}^s x_i^k \prod_{j=1}^l \Phi \left(\frac{u_{s+1}^j - u_i^j}{C x^k} \right) / \sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^l \Phi \left(\frac{u_{s+1}^j - u_i^j}{C x^k} \right) \quad (3)$$

где $\Phi \left(\frac{u_{s+1}^j - u_i^j}{C x^k} \right)$ – ядро функции, выбирается из следующих условий:

- $\int_{-\infty}^{\infty} \Phi(z) dz = 1$, где $z = \frac{u_{s+1}^j - u_i^j}{C x^k}$;
- ядро функции колоколообразное, т. е. $\Phi(z_1) \leq \Phi(z_2)$, для $|z_2| \leq |z_1|$;
- $\int_{-\infty}^{\infty} z^p \Phi(z) dz < \infty, p = 2, 3, \dots$

Параметр размытости C_x ядра Φ удовлетворяет условиям $C_x \rightarrow 0$ и $n C_x(n) \rightarrow \infty$.

При выполнении двух условий оценка \hat{x} является асимптотически несмещенной, состоятельной, асимптотически нормально распределенной.

Приведем примеры треугольного, параболического и кубического ядер:

$$\Phi(z) = \begin{cases} 1 - |z|, & \text{if } |z| \leq 1, \\ 0, & \text{if } |z| > 1; \end{cases} \quad (4)$$

$$\Phi(z) = \begin{cases} (3/4)(1 - z^2), & \text{if } |z| \leq 1, \\ 0, & \text{if } |z| > 1; \end{cases} \quad (5)$$

$$\Phi(z) = \begin{cases} (1 + 2|z|)(1 - |z|)^2, & \text{if } |z| \leq 1, \\ 0, & \text{if } |z| > 1. \end{cases} \quad (6)$$

Параметр размытости C_x выбирается по условию выполнения минимума квадратичного критерия:

$$R = \sum_{i=1}^s (X_i - \hat{X}_i(C_x))^2 \rightarrow \min_{C_x} \quad (7)$$

где s – размер обучающей выборки, с помощью которой методом скользящего экзамена выбирается оптимальный на этой выборке C_x :

$$\hat{x}_i^k = \sum_{n=1}^s x_n^k \prod_{m=1}^l \Phi \left(\frac{u_i^m - u_n^m}{C x_j^k} \right) / \sum_{n=1}^s \prod_{m=1}^l \Phi \left(\frac{u_i^m - u_n^m}{C x_j^k} \right) \quad n \neq i. \quad (8)$$

Рассмотрим последовательный непараметрический алгоритм управления.

Пусть мы имеем ситуацию, когда отсутствует обучающая выборка, а текущая информация об объекте поступает в устройство управления последовательно (активное накопление информации). Тогда обучающийся непараметрический алгоритм управления на такте $t = s$ имеет вид

$$\hat{u}_s^j = \tilde{u}_s^j + \Delta u_s^j, \quad (9)$$

где \hat{u} – оценка вектора входа; Δu_s^j – изучающая добавка [3],

$$\tilde{u}_1^j \in (u_{\min}^j, u_{\max}^j), \quad (10)$$

$$\tilde{u}_s^j = \frac{\sum_{i=1}^{s-1} u_i^j \prod_{f=1}^k \Phi \left(\frac{x_s^f - x_i^f}{C x^f} \right) \prod_{p=1}^n \Phi \left(\frac{\mu_s^p - \mu_i^p}{C \mu^p} \right)}{\prod_{f=1}^k \Phi \left(\frac{x_s^f - x_i^f}{C x^f} \right) \prod_{p=1}^n \Phi \left(\frac{\mu_s^p - \mu_i^p}{C \mu^p} \right)}, \quad (11)$$

$j = \overline{1, m}, s = 2, 3, \dots$

На начальном этапе управления, когда фактически идет процесс обучения, доминирующую роль играет изучающая добавка. Это связано с малой обученностью системы и соответствует выработке пробных шагов, которые могут носить случайный характер, если отсутствует дополнительная априорная информация. По мере изучения объекта при формировании u_s^j все большая роль начинает принадлежать $\tilde{u}^j[s]$.

При управлении реальным процессом естественно использовать опыт обслуживающего персонала (оператора, технолога-эксперта). Для того чтобы использовать опыт эксперта при решении этой задачи, формулу (11) в алгоритме (9) следует модифицировать в виде

$$\tilde{u}_s^j = \frac{\sum_{i=1}^{s-1} u_i^j \prod_{p=1}^k \Phi \left(\frac{x_s^p - x_i^p}{C x^p} \right) \prod_{p=1}^n \Phi \left(\frac{\mu_s^p - \mu_i^p}{C \mu^p} \right) \prod_{j=1}^l \Phi \left(\frac{u_s^j - u_i^j}{C x^j} \right)}{\sum_{i=1}^{s-1} \prod_{p=1}^k \Phi \left(\frac{x_s^p - x_i^p}{C x^p} \right) \prod_{p=1}^n \Phi \left(\frac{\mu_s^p - \mu_i^p}{C \mu^p} \right) \prod_{j=1}^l \Phi \left(\frac{u_s^j - u_i^j}{C x^j} \right)}, \quad (12)$$

$j = \overline{1, m}, s = 2, 3, \dots, \tilde{u}_1^j \in (u_{\min}^j, u_{\max}^j),$

где u^j определяется ЛППР на каждом такте принятия решения. Но ЛППР может определить не все значения компонент вектора u , поэтому $l \leq m$.

Далее рассмотрим непараметрический алгоритм управления с обучающей выборкой.

Пусть $\{u(t), \mu(t), x(t), t = \overline{1, s-1}\}$ – обучающая выборка, состоящая из наблюдения входа и выхода объекта. Непараметрический алгоритм управления в этом случае имеет вид

$$\hat{u}_s^j = \frac{\sum_{i=1}^{s-1} u_i^j \prod_{p=1}^k \Phi \left(\frac{x_s^p - x_i^p}{C x^p} \right) \prod_{p=1}^n \Phi \left(\frac{\mu_s^p - \mu_i^p}{C \mu^p} \right) \prod_{j=1}^l \Phi \left(\frac{u_s^j - u_i^j}{C x^j} \right)}{\sum_{i=1}^{s-1} \prod_{p=1}^k \Phi \left(\frac{x_s^p - x_i^p}{C x^p} \right) \prod_{p=1}^n \Phi \left(\frac{\mu_s^p - \mu_i^p}{C \mu^p} \right) \prod_{j=1}^l \Phi \left(\frac{u_s^j - u_i^j}{C x^j} \right)}, \quad (13)$$

$j = \overline{1, m}, s = 2, 3, \dots, \hat{u}_1^j \in (u_{\min}^j, u_{\max}^j), l \leq m.$

Алгоритм (13) представляет собой оценку обратной регрессии по наблюдениям $\{u(t), \mu(t), x(t), t = \overline{1, s-1}\}$.

В случае если компонентами вектора μ_i , кроме вещественных переменных, являются переменные типа целочисленных и булевых, обучающиеся непараметрические алгоритмы несколько модифицируются.

Рассмотрим модификацию непараметрического обучающегося алгоритма управления с обучающей выборкой в этом случае:

$$\hat{u}_s^j = \frac{\sum_{i=1}^{s-1} u_i^j \prod_{f=1}^k \Phi \left(\frac{x_s^f - x_i^f}{C x^f} \right) \prod_{p=1}^n \Phi \left(\frac{\mu_s^p - \mu_i^p}{C \mu^p} \right) \prod_{h=1}^l \Phi \left(\frac{u_s^h - u_i^h}{C x^h} \right) \prod_{r=1}^c \Phi \left(\frac{\omega_s^r - \omega_i^r}{C \omega^r} \right) \prod_{q=1}^v \Omega(w_s^q - w_i^q)}{\sum_{i=1}^{s-1} \prod_{f=1}^k \Phi \left(\frac{x_s^f - x_i^f}{C x^f} \right) \prod_{p=1}^n \Phi \left(\frac{\mu_s^p - \mu_i^p}{C \mu^p} \right) \prod_{h=1}^l \Phi \left(\frac{u_s^h - u_i^h}{C x^h} \right) \prod_{r=1}^c \Phi \left(\frac{\omega_s^r - \omega_i^r}{C \omega^r} \right) \prod_{q=1}^v \Omega(w_s^q - w_i^q)}, \quad (14)$$

$j = \overline{1, m}, s = 2, 3, \dots, \hat{u}_1^j \in (u_{\min}^j, u_{\max}^j), l \leq m,$

где c и v – соответственно размеры векторов $\omega(t)$ и $w(t)$;
 $\Omega(w_s^q - w_i^q) = \begin{cases} 1, & \text{если } w_s^q = w_i^q, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$

Таким образом, предложенные обучающиеся непараметрические алгоритмы управления могут быть модифицированы и использованы при разработке реальных компьютерных систем управления дискретно-непрерывными процессами.

Библиографический список

1. Медведев, А. В. Адаптация в условиях непараметрической неопределенности / А. В. Медведев // Адаптивные системы и их приложения. Новосибирск: Наука. Сиб. от-ние, 1978. С. 4–34.
2. Медведев, А. В. Непараметрические системы адаптации / А. В. Медведев. Новосибирск: Наука. Сиб. от-ние, 1983. 173 с.
3. Рубан, А. И. Методы анализа данных: в 2-х ч. / А. И. Рубан; КГТУ. Красноярск, 1994. 220 с.

A. R. Nizameev

ABOUT RESEARCHINGS OF NONPARAMETRIC ALGORITHMS OF MUTUALLY CONNECTED PROCESSES

There the scheme and discrete-continuous processes control algorithms are offered. The modifications of algorithms, which are taking into account interaction with the decision maker, presence of material, integer and Boolean variables are considered there.

В. С. Орлов, В. Х. Ханов

ОБ ОДНОМ СТАТИСТИЧЕСКОМ АЛГОРИТМЕ АНАЛИЗА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Рассматривается алгоритм статистического анализа нестационарных (переходных) процессов на примере воздействий, возникающих при авиационном транспортировании специальных грузов. Переходный процесс разделяется на стационарный и нестационарный процессы. Для каждого из них применяются свои процедуры анализа: ударные спектры ускорений для нестационарных процессов и спектральные плотности мощности виброускорений для стационарных процессов. Приводится пример анализа воздействий на груз при его транспортировании (режим посадки) самолетом Ил-76.

Большое количество процессов, происходящих в окружающем мире, относятся к случайным нестационарным явлениям. Особым классом нестационарных процессов являются переходные процессы. Это различные ударные и взрывные явления, начало движения и остановка железнодорожных составов, разделение ракет-носителей, авиационное транспортирование различных грузов и т. д. Как правило, переходные процессы содержат и стационарную составляющую [1].

Алгоритмы обработки стационарных и нестационарных процессов имеют существенные различия, поэтому на первом этапе анализа любых временных зависимостей необходимо разделять стационарные и нестационарные составляющие исследуемых процессов. Известно, что статистическая достоверность результатов должна подтверждаться на достаточно большом числе реализаций. Например, число опытов (реализаций) h при доверительной вероятности P должно быть не менее значений приведенных ниже [2]:

- $P = 0,8, h = 20$;
- $P = 0,9, h = 40$;
- $P = 0,95, h = 80$;
- $P = 0,98, h = 200$.

При этом характеристики внешних воздействующих факторов должны быть равномерно распределены во всем возможном диапазоне величин.

Однако на практике чаще приходится сталкиваться со сравнительно небольшим и даже малым числом опытов. В этом случае для определения характеристик случайных процессов по результатам небольшого числа опытов используются те же формулы, которые применяются и при большом числе опытов. В результате ставится дополнительная задача оценки точности получаемых из опыта характеристик [3].

Далее рассмотрим алгоритм статистического анализа переходных процессов на примере исследования воздействий, возникающих при авиационном транспортировании специальных грузов самолетом Ил-76 в режиме взлета–посадки.

Суть алгоритма состоит в следующем. Имеется набор зависимостей ускорений от времени (набор временных рядов), например полученных на опорах груза в результате измерений при авиационном транспортировании для этапа взлета–посадки. Количество реализаций составляет выборку из 12 случаев транспортирования (рис. 1).

Для каждой точки контроля по всем имеющимся случаям измерений формируется псевдоисходный процесс

длительностью, равной их общей длительности, после чего из созданного псевдоисходного процесса с помощью датчика случайных чисел формируются множества фиктивных выборок. По фиктивным выборкам проводится оценка изменчивости параметра генеральной совокупности по изменчивости его оценок, полученных в фиктивных выборках, и делается заключение о стационарности полученного процесса. Длительность фиктивных выборок по времени составляет 2...4 с.

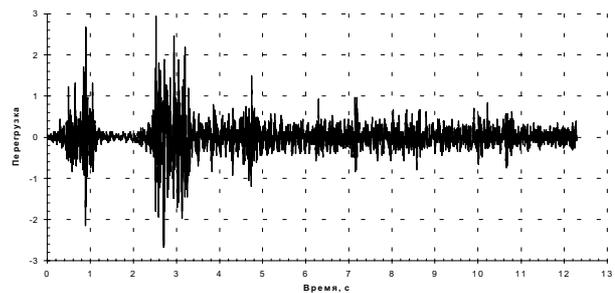


Рис. 1. Типовой график зависимости ускорения от времени на задней опоре груза при посадке самолета Ил-76

Оценка стационарности проводится по стандартным методикам: вычисление среднего, дисперсии и т. д. В большинстве случаев для практики достаточно получить оценку стационарности по среднему и дисперсии.

При выводе о нестационарности процесса из созданного псевдоисходного процесса исключаются составляющие с уровнями выше некоторой заданной величины. Затем повторяется процедура исследования стационарности рассматриваемого процесса, и при необходимости продолжается исключение максимальных составляющих до получения стационарного псевдоисходного процесса. Достаточным шагом по амплитуде ускорения можно принять его значение в 0,1 g. Количество фиктивных выборок должно увеличиваться до тех пор, пока погрешность не стабилизируется. Исследование результатов измерений взлета–посадки самолета Ил-76 показало, что выделение участков с уровнями виброускорений, превышающими ± 1 g, позволяет далее оценивать этот процесс как стационарный (рис. 2).

Таким образом, имеются два процесса: начальный псевдоисходный процесс и полученный из него стационарный псевдоисходный процесс. Далее проводится Фурье-преобразование начального и полученного псевдоисходных процессов, и из коэффициентов Фурье-преоб-

разования начального псевдоисходного процесса вычисляются коэффициенты Фурье-преобразования стационарной части псевдоисходного процесса. В результате такой операции в исходном процессе остаются только нестационарные составляющие. Выполнение обратного преобразования Фурье позволяет получить нестационарную составляющую часть псевдоисходного процесса в виде временной зависимости.

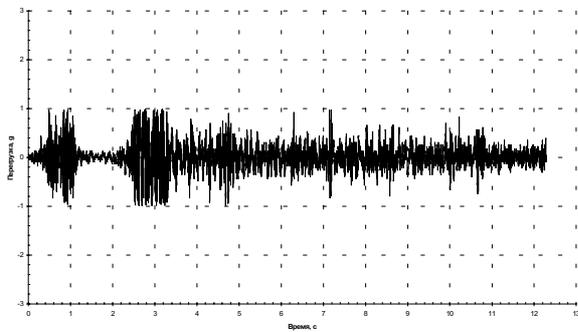


Рис. 2. Типовой вибрографик ускорений с исключенными значениями выше $\pm 1 g$

В результате из одного псевдоисходного процесса получаются два процесса: стационарный и нестационарный, дальнейшая обработка которых проводится по алгоритмам, предназначенным для обработки соответствующих процессов.

Для стационарного процесса это, в первую очередь, получение спектральной плотности мощности виброускорений (рис. 3), а также среднеквадратических значений в полосах частот и гистограмм распределения экстремумов ускорений. Дополнительно проводится построение автокорреляционных функций и взаимных корреляционных функций между значениями вибрационных нагрузок на передней и задней опорах для рассматриваемых временных участков по различным направлениям.

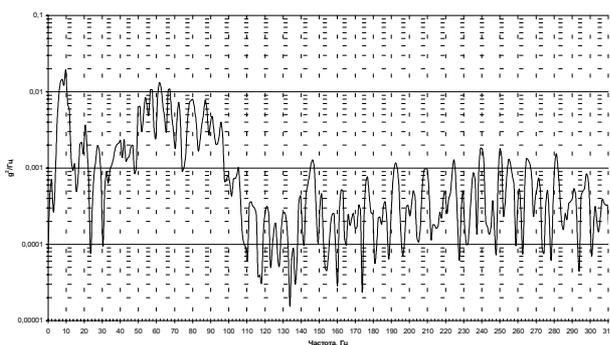


Рис. 3. Огибающая значений спектральной плотности (типичая спектральная плотность) мощности виброускорения для стационарной составляющей по направлению движения самолета

Для нестационарного процесса выполняется построение ударного спектра ускорений, огибающих максимальных и минимальных значений ударных спектров ускорений для различных временных участков и направлений воздействия (рис. 4), а также построение гистограмм распределения текущих значений ускорений (рис. 5). Следует отметить, что гистограммы экстремумов ускорений

строились отдельно для стационарной и нестационарной составляющих рассматриваемого процесса и для полного псевдоисходного процесса. Как и при проверке стационарности, с помощью датчика случайных чисел формируются множества фиктивных выборок, причем количество фиктивных выборок должно увеличиваться до тех пор, пока погрешность не стабилизируется.

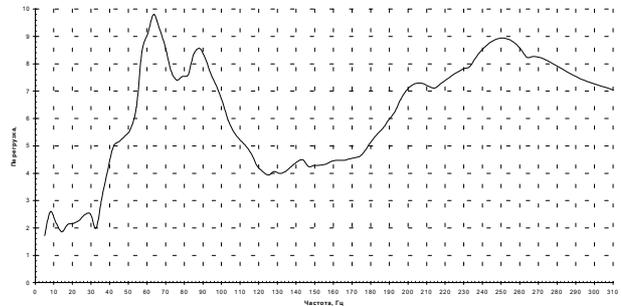


Рис. 4. Огибающий ударный спектр ускорений по направлению движения самолета

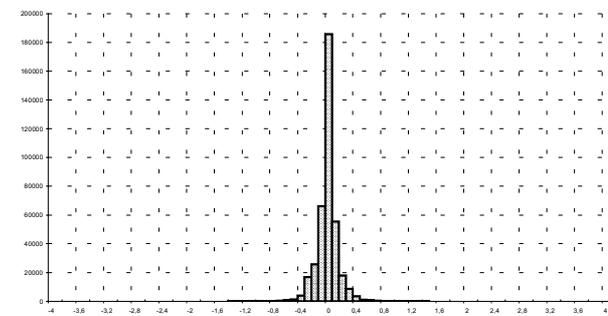


Рис. 5. Гистограмма амплитуд виброускорений по направлению движения самолета для начального псевдоисходного процесса (12 случаев транспортирования)

Для анализа как стационарных, так нестационарных процессов применялся вейвлет-анализ, что позволило связать максимумы ускорений по времени и частоте [4].

Рассмотренный алгоритм дополняет хорошо известный подход к анализу нестационарных процессов, предложенный В. В. Болотиным для исследования сейсмических нагрузок, когда исследуемый процесс представляется в виде произведения функций, описывающих стационарные случайные процессы с заданными спектральными плотностями, и детерминистических функций времени [5]. Одним из наиболее простых таких представлений является формула

$$a(t) = A_0 e^{-ct} \varphi(t) \eta(t),$$

где A_0 , c – некоторые положительные постоянные; $\varphi(t)$ – стационарная случайная функция времени; $\eta(t)$ – функция Хевисайда.

Этап взлета и посадки имеет четко выраженный нестационарный характер, что обуславливается как ударными воздействиями на самолет в момент касания взлетно-посадочной полосы, так и достаточно резким торможением. Причины возникновения вибрационного нагружения транспортируемого груза имеют различную природу и их несколько. Поэтому представить описание такого процесса одной функцией невозможно. Был проведен дополнительный анализ стационарной составляющей

псевдоисходного процесса в частотной области. По результатам предварительной обработки виброграмм воздействие на груз при взлете и посадке может быть представлено в следующем виде:

$$F(t, w) = A(t, w) + B(t, w) + C(t, w) + S(t, w),$$

где $B(t, w)$ – широкополосная случайная составляющая, изменяющаяся в диапазоне $100 \dots 310$ Гц по амплитуде ± 1 g, в диапазоне $3 \dots 100$ Гц $\pm 0,5$ g; $S(t, w)$ – нормальный белый шум с дисперсией 2,5 % от дисперсии суммарного процесса; $A(t, w)$ – узкополосная случайная составляющая, изменяющаяся в диапазоне $50 \dots 80$ Гц для продольных колебаний и $80 \dots 160$ Гц для поперечных колебаний, амплитуда изменяется в диапазоне $\pm 2,5$ g; $C(t, w)$ – низкочастотная узкополосная случайная составляющая, изменяющаяся в диапазонах $5 \dots 7$ Гц и $15 \dots 20$ Гц, амплитуда суммарного сигнала изменяется в пределах $\pm 0,4$ g.

Выражение для $F(t, w)$ может быть представлено в виде

$$F(t, w) = A \cdot \exp[-a(t - t_0)] \sin(\omega t + a) + B \sin(\omega t + b) + C \sin(\omega t + c) + S(t),$$

где A, B, C – константы, соответствующие максимальным значениям ускорений; a, b, c – случайные переменные.

Для анализа рассматриваемых процессов использовался хорошо известный пакет MATLAB. Необходимые для проведения расчетов макросы были написаны на языке Simulink.

Проведенная по представленному алгоритму обработка показала, что анализ псевдоисходных процессов, состоящих из данных по 4...5 и 12 случаям транспортирования, дает результаты, которые практически не отличаются друг от друга. Следует отметить, что полученные уровни воздействий на транспортируемый груз примерно в 3...4 раза (в зависимости от частотного диапазона) ниже представленных в нормах на груз. При этом задание режима испытаний груза при его отработке на транспортирование проводят по точкам контроля, которые использовались для формирования псевдоисходного процесса.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет проводить более точную обработку временных рядов, полученных при регистрации переходных процессов. Для реализации такого алгоритма требуется разработка автоматизированной системы обработки данных, для чего необходимо создать базу данных (БД), которая включала бы всю исходную информацию в структурированном виде, которая содержит данные об исследуемых процессах, все промежуточные данные и окончательные результаты обработки. Для удобства хранения и доступа создаваемая база данных должна быть объектно-ориентированной и состоять из головного файла, файлов таблиц и файлов индексов таблиц.

Целью разработки любой базы данных является хранение и использование информации о какой-либо предметной области. Целью разрабатываемой БД в нашем случае является хранение и использование различных данных об исходных временных рядах, результаты промежуточной и окончательной обработки различных параметров, а также интеграция работы прикладных программ (подсистем), которые производят оценочные расчеты этих параметров.

Работа с базой данных организуется по принципу клиент–сервер; в качестве клиента выступает подпрограмма оценки одного из параметров. Подсистемы обращаются к БД, считывают данные, обрабатывают, а затем записывают информацию в БД или файлы результатов. Очевидно, что такая база данных должна иметь достаточно сложную структуру, так как с ней работает несколько подсистем, которые рассчитывают различные параметры. При проектировании БД анализируемый процесс раскладывается на отдельные типы объектов, соответствующим типам обработки. То, какие свойства объекта необходимо хранить в таблицах, определяется типом объектов и тем, какие подсистемы будут работать с таблицами, а также с информационными потоками между подсистемами. При стратегическом планировании БД должны учитываться требования на данные всех подсистем, которые будут работать с БД. Такой подход избавляет от необходимости переписывать уже имеющиеся приложения (подсистемы) при добавлении в интегрированную многоуровневую систему новой подсистемы [6; 7].

Библиографический список

1. Гладкий, В. Ф. Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата / В. Ф. Гладкий. М.: Наука, 1975. 456 с.
2. Лавренчик, В. Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов / В. Н. Лавренчик. М.: Энергоиздат, 1986.
3. Купер, Дж. Вероятностные методы анализа сигналов и систем / Дж. Купер, К. Макгиллем. М.: Мир, 1989.
4. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». М.; Ижевск, 2001. 464 с.
5. Болотин, В. В. Случайные колебания упругих систем / В. В. Болотин. М.: Наука, 1979. 336 с.
6. Сигнор, Р. Использование ОДБС для доступа к данным / Р. Сигнор, М. Стегман. М.: Бином, 1995. 379 с.
7. Григорьев, Ю. А. Банки данных / Ю. А. Григорьев, Г. И. Ревунков. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 318 с.

V. S. Orlov, V. H. Khanov

ABOUT ALONE ALGORITHM OF ANALYZING INTERMITTENT PROCESSES

The algorithm of statistic analysis of intermittent processes is under consideration on the sample of impacts, taking place while aviation transporting of special cargos. Intermittent process is being separated into stationary and intermittent components. Shock spectrum is being built for stationary part and spectrum densities of power are created for intermittent part. The example of analyzing forces, effecting the cargo of IL-76 during the landing is adduced.

Е. С. Семенкин

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

Подводятся итоги 10 лет работы красноярской школы по моделированию и оптимизации сложных систем эволюционными алгоритмами

За 10 лет активной работы в Красноярске исследовательской группы (школы) по эволюционным алгоритмам и их применениям в моделировании и оптимизации сложных систем, в которую входят преподаватели, сотрудники, докторанты и аспиранты Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева и преподаватели Сибирского юридического института МВД РФ, а также работники производственных предприятий Красноярска, получены значительные теоретические и практические результаты, защищенные в шестнадцати кандидатских [1...4; 6...8; 10; 12; 17...23] и четырех докторских [5; 9; 11; 13] диссертациях, а также в магистерских диссертациях [23; 24], рекомендованных к защите в качестве кандидатских. Итоги работы группы подведены в монографиях [14...16]. Новые перспективные направления развиваются в квалификационных выпускных работах бакалавров [26; 27].

Прикладные работы представлены следующими направлениями: проектирование систем управления космическими аппаратами и орбитальными группировками [1...3; 5; 13], проектирование многопроцессорных вычислительных систем оперативного управления [6; 8; 9], управление организационно-техническими системами [4; 7; 11; 12], управление производственными процессами [10; 11...13; 17; 23], автоматизация проектирования интеллектуальных информационных технологий [5; 18...22].

Ниже будут представлены основные научные и практические результаты работы группы и направления дальнейшего развития ее исследований.

Комплекс моделей функционирования сложных систем. Необходимость применения эволюционных алгоритмов вызвана сложностью решаемых задач оптимизации, которые обладают следующими свойствами: разнотипными переменными (вещественными, целочисленными, булевыми), алгоритмически заданными целевыми функциями и функциями-ограничениями, наличием многих моделей для описания управляемых объектов, многокритериальностью и т. д. Данные задачи оптимизации опираются на комплексы моделей функционирования сложных систем, для управления которыми необходимо осуществлять выбор эффективных вариантов систем управления. В ходе выполнения исследований проделана следующая работа:

- проведен системный анализ процесса функционирования системы управления космическими аппаратами и орбитальными группировками;
- осуществлен системный анализ процесса планирования загрузки производственных ресурсов в условиях нерегулярного поступления мелкосерийных заказов;
- проведен системный анализ организации работы и процесса функционирования многопроцессорных вы-

числительных систем автоматизированного управления сложными процессами в режиме реального времени;

- определена и изучена проблематика отраслевого предприятия Минатома в условиях закрытого административно-территориального образования (ЗАТО), исследованы проблемные ситуации и их генезис, выполнен анализ проблематики создания информационной среды отраслевого предприятия Минатома в условиях ЗАТО;

- разработана система поддержки принятия решений при моделировании сложных систем марковскими процессами;

- проведено исследование систем управления реструктурируемых предприятий военно-промышленного комплекса (ВПК), выявлены их особенности, определены основные направления модернизации управления предприятиями;

- проведен анализ системы принятия решений при управлении инновациями на реструктурируемом предприятии ВПК и установлены типы принимаемых решений, имеющие решающее значение для обеспечения высокой эффективности инновационного процесса.

В результате построены следующие модели:

- комплекс формальных моделей выбора эффективного варианта системы управления космическими аппаратами и орбитальной группировкой, отличающихся тем, что в них учтена структура наземного комплекса управления и распределение выполняемых операций, а также взаимосвязь между контурами системы управления, обеспечивающих возможность оптимального проектирования и планирования загрузки системы управления [1...3; 5; 7; 13; 14; 16];

- комплекс формальных моделей оптимизации загрузки производственных ресурсов в условиях нерегулярного поступления мелкосерийных заказов. В этом случае оптимизация выполняется по технологическим и стоимостным критериям, что позволяет оптимально встраивать коммерческие заказы в основной производственный план [1; 10; 13; 16];

- комплекс математических моделей оценки характеристик надежности и производительности, а также описания функционирования многопроцессорных вычислительных комплексов произвольной конфигурации для оперативного управления сложными процессами в реальном времени [6; 8; 9; 15; 25];

- комплекс формальных моделей формирования структуры распределенной информационной системы для управления сложными организационно-техническими объектами [4; 11; 14; 15];

- структурная модель проблематики и структурная модель информационной среды отраслевого предприятия Минатома в условиях ЗАТО [11; 14; 15];

– комплекс модифицированных математических моделей планирования работы предприятия, которые позволяют осуществлять поддержку принятия решений при распределении финансовых и материальных ресурсов и эффективно согласовывать интересы центров финансовой ответственности и центрального управляющего органа при управлении инновационными процессами на децентрализованном предприятии ВПК [17; 23; 24];

– математические модели оптимизации планирования взлетов и посадок самолетов в аэропортах [12], формирования заявок на поставку товаров крупной торговой компании [12], формирования кредитного портфеля коммерческого банка [12; 24].

Комплекс оптимизационных процедур. Применение разработанных моделей при поддержке принятия решений в управлении сложными техническими, организационно-техническими и организационными системами требует решения сложных задач оптимизации. Для обеспечения такой возможности были разработаны следующие оптимизационные процедуры:

– процедуры решения многоуровневых многокритериальных многошкальных задач оптимизации методами локального и адаптивного поиска, предлагающие специальную организацию программных средств и позволяющие эффективно решать задачи выбора эффективных вариантов сложных систем [3; 5; 9; 11];

– метод обобщенного адаптивного поиска, представляющий собой многопопуляционный эволюционный алгоритм с обобщенными структурами окрестностей, операциями преобразования и отбора решений и стратегиями оптимизации, позволяющий организовать взаимодействие популяций, которые ведут к автоматическому выбору метода оптимизации и адаптации его параметров в процессе решения задачи [5; 21];

– обобщенные алгоритмы регулярного локального поиска для оптимизации функций с булевыми, целочисленными и смешанными переменными, автоматически настраивающиеся на специфические свойства оптимизируемых функций в ходе процесса оптимизации [13];

– регулярные алгоритмы глобальной оптимизации монотонных функций с булевыми и целочисленными переменными, реализующие информационную сложность класса функций [1; 5; 10; 13; 16];

– алгоритм глобальной оптимизации произвольных функций с булевыми, целочисленными и смешанными переменными, реализующий мультистарт обобщенного локального поиска из начальных точек, полученных кластерным эволюционным алгоритмом [13; 16];

– алгоритмы решения дискретных задач условной оптимизации с алгоритмическими заданными функциями произвольной формы, основанные на сочетании методов прямого поиска и модификации метода множителей Лагранжа [8; 9; 15];

– алгоритмы адаптивной поисковой оптимизации, позволяющие строить и сужать репрезентативную аппроксимацию множества и фронта Парето при алгоритмически заданных функциях разнотипных переменных [4; 7; 17; 24];

– гибридные поисковые процедуры, сочетающие эволюционные алгоритмы, методы ветвей и границ, локального поиска и позволяющие эффективно решать задачи

смешанного целочисленного программирования [12; 13; 23; 26];

– гибридные поисковые процедуры с нейросетевой аппроксимацией сложной целевой функции в ходе решения задачи оптимизации [2; 5; 26].

Автоматизация проектирования интеллектуальных систем. Полученный опыт и разработанные алгоритмы решения сложных задач оптимизации позволили начать исследования в такой актуальной и перспективной области, как автоматизация проектирования систем искусственного интеллекта (интеллектуальных информационных технологий). При разработке систем искусственного интеллекта основной проблемой является перенос экспертных знаний человека-специалиста в компьютерную систему.

При построении нейронных сетей это можно сделать автоматически по предъявленному задачнику, но при этом логика решения задачи интеллектуальной системы остается неясной для человека-пользователя. Для преодоления этой проблемы выполнена работа [19], в которой разработана программная система, обеспечивающая автоматическое извлечение знаний в явном виде из обученной нейронной сети.

Системы на нечеткой логике используют базу знаний в явном виде, т. е. они не обладают недостатком нейронной сети, однако не могут настраиваться автоматически и требуют длительного взаимодействия с человеком-экспертом. Эволюционные алгоритмы позволяют автоматизировать процесс генерирования базы знаний, обеспечивая целенаправленный перебор различных вариантов таких баз знаний с оценением их эффективности на наборе тестовых задач. Решению данной проблемы посвящены работы [18; 27].

В диссертации [20] применена комплексная интеллектуальная процедура, использующая нейронные сети и алгоритм генетического программирования для прогнозирования успешности обучения студентов по результатам психодиагностического тестирования абитуриентов.

Еще одно новое и перспективное направление исследований – создание системы автоматического построения аналитических моделей и комплексной оптимизации сложных систем – открывает работа [22], в которой в рамках единого эволюционного подхода предлагается строить аналитические зависимости, описывающие функционирование сложных систем (с использованием генетического программирования), и выполнять по ним оптимизацию (с использованием вероятностного генетического алгоритма).

Направлением дальнейших исследований красноярской группы по моделированию и оптимизации является разработка и исследование эффективных эволюционных методов автоматического формирования причинно-следственных связей и функциональных зависимостей при моделировании сложных систем и алгоритмов оптимизации сложных систем с использованием построенных моделей.

Библиографический список

1. Семенкина, О. Э. Поисковые методы синтеза систем управления космическими аппаратами: дис. ... канд. техн. наук / О. Э. Семенкина; САА. Красноярск, 1995. 165 с.

2. Вишневецкая, С. Р. Аппроксимация в задачах оптимизации управления космическими аппаратами: дис. ... канд. техн. наук / С. Р. Вишневецкая; САА. Красноярск, 1997. 167 с.
3. Абрамович, К. Ю. Методы решения специальных классов задач оптимизации при синтезе управления космическими аппаратами: дис. ... канд. техн. наук / К. Ю. Абрамович; САА. Красноярск, 1997. 156 с.
4. Коробейников, С. П. Методы многокритериальной оптимизации для задач синтеза управления сложными объектами: дис. ... канд. техн. наук / С. П. Коробейников; ГХК. Красноярск, 1997. 174 с.
5. Семенкин, Е. С. Метод обобщенного адаптивного поиска для оптимизации управления космическими аппаратами: дис. ... д-ра техн. наук / Е. С. Семенкин; САА. Красноярск, 1997. 400 с.
6. Нечушкин, А. П. Моделирование и совершенствование функционирования специализированных многопроцессорных технических средств управления: дис. ... канд. техн. наук / А. П. Нечушкин; САА. Красноярск, 1998. 132 с.
7. Гарипов, В. Р. Многокритериальная оптимизация систем управления сложными объектами методами эволюционного поиска: дис. ... канд. техн. наук / В. Р. Гарипов; САА. Красноярск, 1999. 138 с.
8. Тынченко, С. В. Модели и алгоритмы выбора надежных вариантов многопроцессорных вычислительных комплексов оперативного управления сложными техническими системами: дис. ... канд. техн. наук / С. В. Тынченко; НИИ СУВПТ. Красноярск, 2000. 146 с.
9. Терсков, В. А. Моделирование и оптимизация структуры многопроцессорных вычислительных систем автоматизированного управления в реальном времени: дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Терсков; САА. Красноярск, 2001. 318 с.
10. Ильина, Т. Р. Модели и алгоритмы оптимизации загрузки ресурсов в условиях мелкосерийного производства: дис. ... канд. техн. наук / Т. Р. Ильина; НИИ СУВПТ. Красноярск, 2001. 149 с.
11. Лебедев, В. А. Модели и методы формирования структуры информационной системы для управления сложным объектом: дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Лебедев; ГХК; НИИ СУВПТ. Красноярск, 2002. 257 с.
12. Хоролич, Г. Б. Эволюционные алгоритмы решения задач смешанной целочисленной оптимизации: дис. ... канд. техн. наук / Г. Б. Хоролич; СибГАУ. Красноярск, 2002. 155 с.
13. Семенкина, О. Э. Метод обобщенного локального поиска для задач принятия решений в управлении сложными системами: дис. ... доктора техн. наук / О. Э. Семенкина; НИИ СУВПТ. Красноярск, 2002. 334 с.
14. Семенкин, Е. С. Метод обобщенного адаптивного поиска для синтеза систем управления сложными объектами / Е. С. Семенкин, В. А. Лебедев. М.: МАКС-Пресс, 2002. 320 с.
15. Лебедев, В. А. Моделирование и оптимизация многопроцессорных систем оперативного управления / В. А. Лебедев, В. А. Терсков. М.: МАКС-Пресс, 2002. 330 с.
16. Семенкина, О. Э. Оптимизация управления сложными системами методом обобщенного локального поиска / О. Э. Семенкина, В. В. Жидков. М.: МАКС-Пресс, 2002. 215 с.
17. Клешков, В. М. Модели и алгоритмы распределения общих ресурсов при управлении инновациями реструктурированного предприятия ВПК: дис. ... канд. техн. наук / В. М. Клешков; НИИ СУВПТ. Красноярск, 2003. 171 с.
18. Галыгин, А. Н. Алгоритмы автоматического формирования базы правил для систем управления на нечеткой логике: дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Галыгин. Красноярск, 2004. 124 с.
19. Ильин, Е. С. Интеллектуальная система анализа данных на основе нейронных сетей: дис. ... канд. техн. наук / Е. С. Ильин; СибГАУ. Красноярск, 2004. 152 с.
20. Павлюк, А. А. Система интеллектуального анализа данных для прогнозирования успешности учебной деятельности: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Павлюк; СибГАУ. Красноярск, 2004. 114 с.
21. Жукова, М. Н. Коэволюционный алгоритм решения сложных задач оптимизации: дис. ... канд. техн. наук / М. Н. Жукова; СибГАУ. Красноярск, 2004. 126 с.
22. Сопов, Е. А. Эволюционные алгоритмы моделирования и оптимизации сложных систем: дис. ... канд. техн. наук / Е. А. Сопов; СибГАУ. Красноярск, 2004. 132 с.
23. Гупалов, К. В. Модели и алгоритмы оптимизации для управления инновациями реструктурированного предприятия ВПК: дис. ... канд. техн. наук / К. В. Гупалов; НИИ СУВПТ. Красноярск, 2004. 151 с.
24. Гуменникова, А. В. Разработки и исследование адаптивного поискового алгоритма решения многокритериальных задач условной оптимизации: дис. ... магистра техники и технологий / А. В. Гуменникова; СибГАУ. Красноярск, 2004. 86 с.
25. Панфилов, И. А. Сравнительный анализ эффективности методов решения СЛАУ при моделировании функционирования МВС: дис. ... магистра техники и технологий / И. А. Панфилов; СибГАУ. Красноярск, 2004. 61 с.
26. Бежитский, С. С. Разработка и исследование гибридного алгоритма решения сложных задач оптимизации: квалификац. работа бакалавра техники и технологий / С. С. Бежитский; СибГАУ. Красноярск, 2004. 58 с.
27. Липинский, Л. В. Программная система автоматического формирования нечеткого логического контроллера: квалификац. работа бакалавра техники и технологий / Л. В. Липинский, В. А. Малько; СибГАУ. Красноярск, 2004. 54 с.

E. S. Semenkin

EVOLUTIONARY ALGORITHMS OF DECISION SUPPORT FOR COMPLEX SYSTEMS MANAGEMENT AND CONTROL

Results of 10 years activity of Krasnoyarsk team of complex systems modeling and optimization with evolutionary algorithms are presented.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АФФИННОЙ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТА ПО ДВИЖЕНИЮ

Анализируется задача оценки трехмерной формы объекта с использованием нескольких его изображений. Рассматривается случай аппроксимации сцены аффинными моделями. Приведено определение аффинной структуры объекта по двум и более его изображениям. Показано преобразование аффинных изображений к евклидовым изображениям.

В контексте задачи стереозрения технических систем камеры, используемые для получения входных изображений, обычно калибруются так, что их внутренние параметры известны, а внешние параметры определены относительно некоторой глобальной системы отсчета. Такое допущение значительно упрощает процесс восстановления трехмерной формы объекта. Однако с точки зрения практической значимости более интересным случаем является ситуация, когда положения видеокамер и, возможно, их внутренние параметры не известны априори и могут меняться со временем. Такое положение является обычным для приложений визуализации на основе анализа изображений, когда видеоклип, записанный посредством ручной камеры с изменением масштаба в процессе съемки, используется для фиксации формы объекта и его визуализации при новых условиях наблюдения. Аналогичная задача возникает и в системах активного зрения, калибровочные параметры которых динамически варьируются (например, при навигации адаптивных мобильных роботов, изменении параметров вследствие большого ускорения при взлете и посадке автоматических планетарных зондов).

Рассмотрим геометрическую задачу оценки трехмерных положений соответствующих точек объекта в некоторой глобальной системе отсчета на основе использования согласованных элементов изображений, т. е. восстановления структуры сцены, и проекционных матриц, соотнесенных с камерами наблюдения (что эквивалентно движению точек относительно камер). Допустим, что рассматриваются сцены, рельеф которых изменяется незначительно по сравнению с их общей глубиной относительно камер, наблюдающих эти сцены, так что перспективу можно аппроксимировать простыми аффинными моделями процесса формирования изображения.

Выведем уравнение слабopersпективной проекции. Если через z_r обозначить глубину контрольной точки R , то два этапа проектирования $P \rightarrow P' \rightarrow p$ можно записать в нормированной системе координат, привязанной к камере, следующим образом

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \\ z_r \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x/z_r \\ y/z_r \\ 1 \end{pmatrix},$$

или в матричной форме

$$\begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{z_r} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Если ввести калибровочную матрицу камеры K и ее внешние параметры Ω и t , то можно получить общий вид

уравнения проекции

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{z_r} K \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Omega & t \\ \mathbf{i}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P \\ 1 \end{pmatrix},$$

где P – неоднородный координатный вектор точки P во внешней системе отсчета; O – вектор системы координат. Отметим, что величина z_r постоянна и поэтому можно записать

$$K = \begin{pmatrix} \hat{E}_2 & \rho_0 \\ \mathbf{i}^T & 1 \end{pmatrix}, \text{ где } K_2 \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} \alpha & -\alpha \text{ctg } \theta \\ 0 & \beta \\ & \sin \theta \end{pmatrix} \text{ и } \rho_0 \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix}.$$

Это позволяет переписать уравнение в виде

$$\rho = M \begin{pmatrix} P \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где M – проекционная матрица размером 2×4 , $M = (A \ b)$; $\rho = (u, v)^T$ – неоднородный координатный вектор точки r . В этом выражении матрица A размера 2×3 и двухзначный вектор b задаются соответственно формулами $A = \frac{1}{z_r} K_2 \Omega_2$ и $b = \frac{1}{z_r} K_2 t_2 + \rho_0$, где Ω_2 – матрица размером 2×3 , образованная двумя первыми строками матрицы Ω ; t_2 – двухзначный вектор, образованный двумя первыми координатами вектора t . Отметим, что значения z_r , α и β в выражении для M объединены и значение z_r , как правило, заранее не известно, поэтому можно записать:

$$M = \frac{1}{z_r} \begin{pmatrix} k & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} (\Omega_2 \ t_2), \quad (2)$$

где k и s – соответственно формат изображения и наклон камеры. В частности, матрица слабopersпективной проекции задается двумя внутренними параметрами (k и s), пятью внешними параметрами (три угла, определяющие Ω_2 , и две координаты t_2) и одним структурным параметром, зависящим от сцены, а именно: z_r .

Можно показать, что уравнение парapersпективной проекции записывается в общей аффинной форме (уравнение (1)) с параметром M , равным

$$M = \frac{1}{z_r} \begin{pmatrix} k & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 & -x_r/z_r \\ 0 & 1 & -y_r/z_r \end{pmatrix} \Omega_2 t_2 \right), \quad (3)$$

где переменные x_r , y_r и z_r – это координаты контрольной точки R в нормированной системе координат камеры. Заметим, что выражение (3) сводится к уравнению слабopersпективной проекции (2) при условии $x_r = y_r = 0$. Согласно уравнению (3), матрица парapersпективной проекции задается двумя внутренними параметрами (k , s), пятью внешними параметрами (три угла, определяющие Ω , и две координаты t_2) и тремя структурными параметрами x_r , y_r и z_r .

На практике в качестве контрольной точки часто берется характерная точка объекта, проекцию которой легко наблюдать на изображении. При этом координаты x_r, y_r и z_r этой точки измерить на изображении нельзя, но можно определить координаты ее проекции u_r и v_r . Перепишем уравнение (3) в следующем виде:

$$M = \frac{1}{z_r} \begin{pmatrix} k & s & u_0 - u_r \\ 0 & 1 & v_0 - v_r \end{pmatrix} \Omega \begin{pmatrix} k & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{t}_2. \quad (4)$$

При такой формулировке матрица параперспективной проекции задается четырьмя параметрами (k, s, u_0 и v_0), пятью внешними параметрами (три угла, определяющие Ω , и две координаты \mathbf{t}_2) и единственным структурным параметром z_r .

Уравнения ортогональной и параперспективной проекций получаются по уравнениям слабоперспективной и параперспективной проекций, если положить значение переменной z_r равным некоторой фиксированной величине (на практике часто берут $z_r = 1$) и подставить результат в выражения (2), (3) или (4). Если одна сцена наблюдается с помощью нескольких ортогональных камер (что соответствует последовательности изображений, снимаемых с помощью одной камеры с переменным фокусным расстоянием), то становятся важными реальные коэффициенты увеличения изображения, а упрощенные калибровочные матрицы, которые фигурируют в уравнениях (2), (3) или (4), следует заменить матрицей Ω_2 .

Таким образом, при n фиксированных точках P_j ($j = 1, \dots, n$), которые наблюдаются m аффинными камерами, и соответствующих mn векторах (в неоднородных координатах) ρ_{ij} этих изображений аффинные проекции из формулы (1) можно переписать таким образом:

$$\rho_{ij} = M_i \begin{pmatrix} P_j \\ 1 \end{pmatrix} = A_i P_j + b_i \text{ для } i = 1, \dots, m \text{ и } j = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Следовательно, определение аффинной группы по движению – это задача оценки m матриц $M_i = (A_i \mathbf{b}_i)$ размера 2×4 и n положений R_j точек P_j в некоторой глобальной системе координат mn соответствиям элементов изображения ρ_{ij} .

Если проекционные матрицы M_i могут иметь любой вид, когда (неизвестны внутренние и внешние параметры камер), по формуле (5) получаем $2mn$ условий на $8m + 3n$ неизвестных коэффициентов, по которым определяются матрицы M_i и положения точек P_j . Поскольку для достаточно больших значений m и n число $2mn$ значительно больше суммы $8m + 3n$, то очевидно, что большое число точек наблюдения и достаточно большое число точек объекта позволяют восстановить соответствующую структуру и параметры движения, например посредством схем наименьших квадратов. Здесь важным моментом является то, что если матрицы M_i и P_j – это решения уравнения (5), то решениями также являются такие матрицы M'_i и

P'_j , что $M'_i = M_i \Psi$ и $\begin{pmatrix} P'_j \\ 1 \end{pmatrix} = \Psi^{-1} \begin{pmatrix} P_j \\ 1 \end{pmatrix}$, где Ψ – матрица произвольного аффинного преобразования. Иными словами, матрицу Ψ можно записать следующим образом:

$$\Psi = \begin{pmatrix} C & d \\ O^T & 1 \end{pmatrix} \text{ и } \Psi^{-1} = \begin{pmatrix} C^{-1} & -C^{-1}d \\ O^T & 1 \end{pmatrix},$$

где C – несингулярная матрица 3×3 ; d – вектор в пространстве R^3 . Таким образом, любое решение задачи нахождения аффинной структуры по движению можно определить только с точностью до аффинного преобразования. Учитывая, что общее аффинное преобразование задается 12 параметрами, следует ожидать, что число возможных решений будет конечным, так как $2mn \geq 8m + 3n - 12$. При $m = 2$ для определения (с точностью до аффинного преобразования) двух проекционных матриц и положения в трехмерном пространстве любой точки должно быть достаточно четырех точечных соответствий.

Если внутренние параметры камер известны (в этом случае калибровочные матрицы можно считать единичными), то на параметры проекционных матриц $M_i = (A_i \mathbf{b}_i)$ нужно наложить дополнительные условия. Например, матрица A_i , соотнесенная с откалиброванной слабоперспективной камерой, формируется из первых двух строк матрицы поворота, умноженных на обратную глубину соответствующей наблюдаемой точки. Подобные ограничения могут использоваться для устранения аффинной неоднозначности при наличии достаточного числа изображений. Таким образом, решение поставленной задачи разбивается на два этапа [1]:

- использование по крайней мере двух изображений сцены для создания однозначного (с точностью до произвольного аффинного преобразования) трехмерного представления сцены, называемого ее аффинной формой. При этом аффинная форма наблюдаемой сцены восстанавливается по характерным точкам, согласованным для последовательности изображений;

- применение дополнительных точек наблюдения сцены и условий, связанных с известными калибровочными параметрами камер и конкретными аффинными моделями, для однозначного определения жесткой евклидовой структуры сцены.

На первом этапе получается необходимая часть решения, поскольку аффинная форма – это завершенное трехмерное представление сцены, которое можно использовать для синтеза новых проекций сцены. На втором этапе определяется Евклидово уточнение сцены, т. е. определяется аффинное преобразование, отвечающее жесткой структуре сцены и отображающее ее аффинную форму в Евклидову форму представления. При этом если использовать три и большее число изображений, то задача определения структуры по движению получается переопределенной (по схеме наименьших квадратов можно получить более устойчивое решение).

Рассмотрим определение аффинной структуры и движения по двум изображениям одной сцены. Известны две взаимодополняющие технологии определения структуры по движению: геометрическое восстановление сцены с целью выявления ее аффинной формы, по которой можно определить проекционные матрицы, и нахождение проекционных матриц с помощью геометрических манипуляций, что позволяет вычислить положение точек наблюдаемого объекта.

При геометрическом восстановлении сцены считается, что двух аффинных проекций четырех точек A, B, C, D должно быть достаточно для вычисления аффинных координат любой другой точки P в базисе (A, B, C, D) . При

этом предполагается, что аффинная проекция плоскости на другую плоскость представляет собой аффинное преобразование. В частности, если точка P принадлежит плоскости Π , которая содержит треугольник ABC , то ее аффинные координаты в базисе Π , сформированном тремя этими точками, можно непосредственно измерить на любом из двух изображения. В работе [2] сформулирована и доказана теорема об определении аффинной структуры по движению: для двух заданных аффинных проекций четырех некопланарных точек аффинная форма сцены определяется однозначно.

При алгебраической оценке движения пренебрегают геометрической природой объекта и производят простые алгебраические действия по упрощению вида проекционных матриц [1], в результате чего получают простой метод восстановления таких матриц и соответствующей аффинной формы объекта. Введем аффинный эквивалент эпиполярного условия. Рассмотрим два аффинных изображения и перепишем соответствующие проекционные уравнения:

$$\begin{cases} \rho = AP + b, \\ \rho' = A'P + b' \end{cases} \text{ при } \begin{pmatrix} A & \rho - b \\ A' & \rho' - b' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P \\ -1 \end{pmatrix} = 0.$$

Необходимым и достаточным условием наличия нетривиального решения данных уравнений будет равенство детерминанта нулю

$$\text{Det} \begin{pmatrix} A & \rho - b \\ A' & \rho' - b' \end{pmatrix} = 0, \text{ или } \alpha u + \beta v + \alpha' u' + \beta' v' + \delta = 0,$$

где $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ и δ – константы, зависящие от A, b, A' и b' ; uOv и $u'O'v'$ – системы координат первого и второго изображений соответственно. Такое условие называется аффинным эпиполярным условием.

Вообще говоря, аффинную эпиполярную геометрию можно рассматривать как предельный случай перспективной геометрии. Действительно, можно показать, что аффинное изображение является пределом последовательности изображений, полученных перспективной камерой, увеличивающей масштаб изображения сцены при одновременном удалении от нее. Данное эпиполярное условие можно записать следующим образом:

$$\text{Det} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & u \\ 0 & 1 & 0 & v \\ 0 & 0 & 0 & u' \\ a & b & c & v' - d \end{pmatrix} = -\alpha u - \beta v - \alpha' u' + \beta' v' - d = 0.$$

Здесь коэффициенты a, b, c и d связаны с параметрами $\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ и δ соотношениями $a : \alpha = b : \beta = c : \alpha' = -1 : \beta' = d : \delta$. При наличии достаточного числа точечных соответствий коэффициенты a, b, c и d можно оценить по схеме наименьших квадратов. В данном случае две проекционные матрицы становятся известными и положение любой точки можно оценить по координатам ее изображений. При этом решается соответствующая система из четырех уравнений с тремя неизвестными координатами \tilde{P} :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & u \\ 0 & 1 & 0 & v \\ 0 & 0 & 0 & u' \\ a & b & c & v' - d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{P} \\ -1 \end{pmatrix} = 0. \quad (6)$$

Отметим, что первых трех уравнений системы (6), в принципе, достаточно для нахождения \tilde{P} как $(u, v, u')^T$, без определения коэффициентов a, b, c и d и наличия минимального числа соответствий. Но использование всех четырех уравнений может дать более точные результаты.

Теперь рассмотрим задачу восстановления структуры аффинной сцены и соответствующих проекционных матриц при наличии потенциально большого набора изображений. Будем считать, что статичная сцена наблюдается с помощью фиксированного набора m аффинных камер. Через p_1, \dots, p_m будем обозначать m проекций точки сцены P . Уравнение (5) в этом случае можно переписать следующим образом:

$$q = r + AP,$$

$$\text{где } q = \begin{pmatrix} p_1 \\ \dots \\ p_m \end{pmatrix}; \quad r = \begin{pmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} A_1 \\ \dots \\ A_m \end{pmatrix}.$$

Если через I обозначить множество всех изображений m камер, то получим

$$I = \{r + AP \mid P \in R^3\} = r + V_A,$$

где V_A – диапазон возможных значений матрицы A размера $2m \times 3$. Другими словами, множество I – это трехмерное подпространство аффинного пространства R^{2m} .

Предположим, что началом системы координат объекта является одна из наблюдаемых точек или центр масс, например P_0 , куда можно перенести начало системы координат изображения p_0 . Преобразование $p \rightarrow p - p_0$ фиксирует начало координат набора изображений I , которое теперь становится трехмерным векторным пространством V_A . Иными словами, для любой точки P и для $I = 1, \dots, m$ можно записать, что $p_i = A_i P$. Эквивалентно, $q = AP$ и

$$I = \{AP \mid P \in R^3\} = V_A.$$

Теперь при m данных изображениях n точек P_1, \dots, P_n можно определить матрицу данных D размером $2m \times n$:

$$D = (q_1 \dots q_n) = AP \text{ при } p = (P_1 \dots P_n).$$

В общем случае ранг произведения матрицы D размером $2m \times 3$ и матрицы размером $3 \times n$ равен 3. Если принять, что UWV^T – это разложение по сингулярным значениям (так называемое SVD -представление) этой матрицы, то тогда только три сингулярных значения являются ненулевыми. Следовательно, $D = U_3 W_3 V_3^T$, где U_3 и V_3 – матрицы $2m \times 3$ и $3 \times n$, сформированные тремя левыми крайними столбцами матриц U и V ; W_3 – диагональная матрица 3×3 , сформированная соответствующими ненулевыми сингулярными значениями.

В качестве представления истинного (аффинного) движения камеры и формы сцены можно взять матрицы $A_0 = U_3$ и $P_0 = W_3 V_3^T$. Действительно, столбцы матрицы A_0 , по определению, формируют базис диапазона значений V_A матрицы D , тогда как столбцы матрицы A_0 , по построению, формируют другой базис этого векторного пространства. Отсюда следует существование такой матрицы Ψ размером 3×3 , что $A = A_0 \Psi$ и, следовательно, $P = \Psi^{-1} P_0$. И наоборот, $D = (A_0 \Psi)(\Psi^{-1} P_0)$ для любой обратной матрицы Ψ размером 3×3 . Если же помимо этой линейной неоднозначности учесть степени свободы, соответствующие возможности выбора положения начала

координат глобальной системы отсчета, то получим еще одно подтверждение аффинной неоднозначности задачи определения структуры по движению. При этом разложение по сингулярным значениям позволяет получить репрезентативные оценки аффинного движения и структуры сцены.

Отметим, что приведенные выше рассуждения справедливы только для идеализированной ситуации отсутствия помех. На практике обычно присутствует так называемый шум изображения, который приводит к ошибкам при локализации характерных элементов изображения. Наличие такого шума объясняется тем, что реальные камеры не являются аффинными, уравнение $D = AP$ не выполняется строго, а матрица D имеет (в общем случае) полный ранг.

Рассмотрим процесс преобразования аффинных изображений в Евклидовы. Предположим, что жесткий объект наблюдается двумя ортографическими откалиброванными камерами, а точки изображения представляются их нормированными координатными векторами. В этом случае преобразование между координатными системами можно записать как суперпозицию вращения и трансляции (под трансляцией будем понимать такое положение двух систем координат, когда их базисные векторы параллельны, но начала координат находятся на некотором расстоянии друг от друга).

При ортографической проекции трансляция по глубине не имеет видимого результата, а трансляция в плоскости изображения (фронтально-параллельное трансляция) легко устраняется выравниванием двух проекций некоторой точки объекта A . Любое вращение вокруг направления наблюдения также легко определяется и устраняется: две точки наблюдения связаны вращением вокруг оси во фронтально-параллельной плоскости, которая проходит через проекцию точки A . В работе [2] показано, что существует однопараметрическое семейство таких вращений, которое определяет форму с точностью до изменения масштаба по глубине и сдвига, и что добавление третьей точки наблюдения окончательно ограничивает решение одной или двумя парами точек, связанными через отражение во фронтально-параллельной плоскости.

Существует простой метод перехода от аффинной структуры к Евклидовой при условии, что аффинные проекционные матрицы камер приблизительно известны. Рассмотрим ортографическую, слабоперспективную и параперспективную модели процесса формирования изображения в предположении, что камеры откалиброваны. При этом можно воспользоваться аффинными проекциями уравнения (5) с учетом определенных условий, наложенных на компоненты проекционной матри-

цы $M = (A \ b)$. Напомним, что слабоперспективная проекционная матрица описывается уравнением (2). Если камера откалибрована, то можно использовать нормированные координаты изображения и допустить, что $k = 1$ и $s = 0$. При этом проекционная матрица принимает вид

$$\hat{M} = (\hat{A} \ \hat{b}) = \frac{1}{z_r} (\Omega_2 \ t_2). \quad (7)$$

Ортографическая камера – это слабоперспективная камера с параметром $z_r = 1$. По уравнению (7) следует, что матрица \hat{A} является частью матрицы вращения, а единичные векторы-строки \hat{a}_1^T и \hat{a}_2^T ортогональны между собой. Иными словами, ортографическая камера – это аффинная камера с дополнительными условиями $\hat{a}_1 \cdot \hat{a}_2 = 0$ и $|\hat{a}_1|^2 = |\hat{a}_2|^2 = 1$.

Общий случай слабоперспективной камеры подобен рассмотренному, но при этом строки матрицы \hat{A} уже не являются единичными векторами. Следовательно, слабоперспективную камеру можно рассматривать как аффинную камеру с двумя условиями: $\hat{a}_1 \cdot \hat{a}_2 = 0$ и $|\hat{a}_1|^2 = |\hat{a}_2|^2$.

Наконец, используя параметризацию параперспективных камер, представленную в виде уравнения (4), легко показать, что параперспективная камера – это аффинная камера, удовлетворяющая следующим условиям:

$$\hat{a}_1 \cdot \hat{a}_2 = \frac{u_r v_r}{2(1 + u_r^2)} |\hat{a}_1|^2 + \frac{u_r v_r}{2(1 + v_r^2)} |\hat{a}_2|^2, \quad \frac{|\hat{a}_1|^2}{(1 + u_r^2)} = \frac{|\hat{a}_2|^2}{(1 + v_r^2)},$$

где параметры u_r и v_r – координаты перспективной проекции опорной точки R , определенной в параперспективной проекционной модели.

Таким образом, разделение задачи определения структуры по движению на аффинный и Евклидовы этапы позволяет использовать простые и устойчивые методы восстановления формы объекта по последовательности его изображений. Аффинный этап описывает трехмерную сцену линейными уравнениями и представляет основу для определения сегментации сцены при анализе движения объекта. При этом траектории точек объекта на образцах описываются линейными комбинациями траекторий его трех опорных точек. На втором этапе вводятся Евклидовы ограничения и уточнения структуры сцены на основе нескольких изображений.

Библиографический список

1. Форсайт, Д. А. Компьютерное зрение. Современный подход: пер. с англ. / Д. А. Форсайт, Ж. Понс. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
2. Koenderink, J. Affine structure from motion / J. Koenderink, A. van Doorn // Journal of the Optical Society of America A8. 1990. P. 377–385.

M. N. Favorskaja

DEFINITION OF AFFINE STRUCTURE OF OBJECT FROM MOTION

The problem of definition of three-dimensional object's form by using some of its pictures is analyzed. The case of scene's approximation by affine models is discussed. The definition of affine structure of object by two or more its pictures is considered. The conversion of affine pictures to euclid pictures are represented in this paper.

**ПЕРЕЧЕНЬ
НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ АСПИРАНТУРЫ
СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА**

Физико-математические науки

- 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела
- 01.02.06 Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры
- 01.04.07 Физика конденсированного состояния
- 01.04.11 Физика магнитных явлений

Химические науки

- 02.00.05 Электрохимия

Технические науки

- 05.02.01 Материаловедение (в машиностроении)
- 05.02.02 Машиноведение, системы приводов и детали машин
- 05.02.05 Роботы, мехатроника и робототехнические системы
- 05.02.08 Технология машиностроения
- 05.02.11 Методы контроля и диагностика в машиностроении
- 05.02.18 Теория механизмов и машин
- 05.03.01 Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки
- 05.03.06 Технология и машины сварочного производства
- 05.07.02 Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов
- 05.07.03 Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов
- 05.07.05 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов
- 05.07.07 Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем
- 05.07.09 Динамика, баллистика, дистанционное управление движением летательных аппаратов
- 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы
- 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации
- 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- 05.13.10 Управление в социальных и экономических системах
- 05.13.13 Телекоммуникационные системы и компьютерные сети
- 05.13.15 Вычислительные машины и системы
- 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы
- 05.22.14 Эксплуатация воздушного транспорта

Экономические науки

- 08.00.05 Экономика и управление народным хозяйством

Философские науки

- 09.00.01 Онтология и теория познания
- 09.00.08 Философия науки и техники
- 09.00.11 Социальная философия

**ПЕРЕЧЕНЬ
НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ДОКТОРАНТУРЫ
СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА**

- 05.07.02 Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов
- 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации
- 05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
- 09.00.01 Онтология и теория познания

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ БОРТОВОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СПУТНИКОВ СВЯЗИ

Рассматриваются концепция и методы, приводящие к существенному повышению эффективности и качества разработки и сопровождения бортового программного обеспечения спутников связи.

Развитие современных систем космической связи требует создания спутниковых группировок долговременного функционирования. В свою очередь долговременность функционирования спутников на требуемом уровне качества, оперативность их создания, восстановления и восполнения во многом обеспечиваются качеством бортового программного обеспечения (БПО), технологией его создания и сопровождения, возможностями инструментальных средств разработки и сопровождения.

В настоящее время в Научно-производственном объединении прикладной механики (НПО ПМ) имени академика М. Ф. Решетнева создана и применяется на четвертой вычислительной платформе технология разработки и сопровождения мобильного программного обеспечения для встроенных систем управления реального времени высоконадежного применения, гарантирующая уровень качества как разработки БПО, так и его долговременного сопровождения.

Технология базируется на специальном архитектурном расчленении БПО и использовании типовых сред программного функционирования и управления; на использовании при разработке и сопровождении БПО интегрированной мобильной среды разработки БПО, базирующейся на свойствах высоконадежного языка программирования Модуля-2; на специальных методах гарантирования качества, рассмотрению которых и посвящена данная статья.

Согласно концепции, применяемой в НПО ПМ при разработке БПО, его качество основано на трех принципах:

- качестве компонентов БПО;
- качестве управления конфигурацией БПО;
- качестве верификации и подтверждения БПО.

Рассмотрим все эти аспекты гарантирования качества, более подробно остановившись на основополагающем принципе – гарантировании качества компонентов.

Качество компонентов. Качество компонентов обеспечивается внедрением в технологию их разработки следующих достижений.

1. Определение канонического архитектурного разделения и расчленения БПО спутника, позволяющее выделить типовой набор компонентов, слоев и подсистем БПО, функционально привязав их к подсистемам изделия и структурно объединив набором стандартных интерфейсов и слоев, например таких, как бортовая среда программного функционирования и среда программного управления [1]. Слои и стандартные интерфейсы обеспечивают переносимость БПО на новые вычислительные платформы и другие изделия, а также возможность простой модификации БПО при эксплуатации. Привязка к подсистемам спутника позволяет четко определить требования к ПО, ответственность за архитектурное проек-

тирование, системное тестирование и подтверждение БПО.

2. Определение стандартного сценария детального проектирования и разработки компонента в рамках стандартного документа описания программы, параллельно с проектированием набора тестов и кодированием программы.

Сценарий предусматривает четыре стадии по уточнению требований к компоненту в процессе его разработки: анализ архитектурного проекта завершен, проектирование завершен, программирование завершен, разработка и автономное тестирование завершены, – обеспечивающих согласование позиций проектанта ПО подсистемы и разработчика компонента.

При детальном проектировании компонента используется метод нисходящей декомпозиции потока управления в чертежах, неформальных обозначениях с использованием графического представления (Р-схем и т. п.).

3. Для программирования используется сильно структурированный язык со строгой типизацией данных Модуля-2. Использование этого языка позволяет не только перенести выявление большинства ошибок программиста на стадию трансляции, но и, благодаря использованию созданных стандартных библиотек типов, обеспечить переносимость компонентов на различные вычислительные платформы, снизить требования к квалификации программистов и увеличить ясность, понимаемость и потенциальную модифицируемость программ для обеспечения их долговременного сопровождения [2; 3].

Для реализации программ создана эффективная кросс-система программирования для базовой вычислительной платформы, допускающая ее адаптацию для новых вычислительных платформ с сохранением всех пользовательских и программных интерфейсов.

4. Использование методов и средств измерения статических и динамических характеристик программ, позволяющих автоматически не только оценивать достигнутые эксплуатационные характеристики программы (объем памяти, время выполнения, размер стека и т. п.), но и делать оценку добротности программы (оценку уровня сложности, уровня комментируемости, выполнения системных соглашений и т. п.).

5. Применение методов документирования процессов тестирования и их повторения, для чего разработан язык пакетной отладки и средства его интерпретации, обеспечивающие как автоматическое определение и документирование достигнутого уровня критериев тестирования С1 и С, так и существенную автоматизацию процессов регрессивного тестирования компонентов.

6. Использование проблемно-ориентированных командных языков и систем для программирования команд уп-

равления конкретным изделием и логики функционирования изделия в целом. Проблемно-ориентированный интерфейс этих систем позволяет создавать и тестировать прикладное программное обеспечение непосредственно проектантами систем без участия программистов, т. е. без шума (неодинакового понимания), возникающего в процессе создания ПО в интерфейсе «проектант системы – программист ПО системы». Влияние этого шума особенно существенно для класса встроенных компьютерных систем, к которому относятся бортовые комплексы управления спутников связи, и при обычном подходе устраняется методами, отмеченными в п. 2, и верификацией.

7. Главная гарантия качества БПО – возможность переиспользования ранее созданного и уже отработанного на должном уровне программного обеспечения, как бортового, так и инструментального. А гарантия качества длительного сопровождения – это постоянство пользовательских и программных интерфейсов БПО и инструментальных средств и надежное управление конфигурацией программного обеспечения и архивов сопровождения. Поэтому важнейшим свойством сохранения и повышения качества компонентов является их переносимость (мобильность).

Возможности, рассмотренные в пп. 1...6, использование единых средств разработки и постоянных проектных соглашений, а также применение метода создания компонентов БПО как унифицированных объектов позволяют переносить до 80 % БПО систем как на новые вычислительные платформы, так и на новые изделия, сохраняя при этом все программные интерфейсы.

Управление конфигурацией. Для управления конфигурацией БПО разработаны методы и средства идентификации и управления объектами, работами и проблемами ПО, процедуры и средства, автоматизирующие процессы управления конфигурацией, а также формы и процедуры электронного документооборота.

Управление обеспечивается тремя электронными подконтрольными архивами: архивом сопровождения работ и проблем, архивом проектов унифицированных программ и архивами БПО изделий.

Каждый объект разработки возникает как компонент, специфицированный архитектурным проектом в рамках конкретного изделия. После утверждения первой редакции архитектурного проекта информация о всех компонентах вместе с графиком их разработки заносится в архив сопровождения работ и проблем этого изделия.

Разработка компонента заканчивается передачей всей документации сопровождения, оформленной как проект программы, в архив проектов унифицированных программ, а сам компонент, настроенный на конкретное применение, передается в архив БПО изделия. В рамках этого архива осуществляется интеграция БПО и его изготовление.

Компонент разрабатывается в рамках изделия как объект, унифицированный по соглашениям, интерфейсам и языку программирования и библиотекам типов данных. Благодаря этому свойству он пригоден к заимствованию на другие изделия.

После попадания в архив ошибки в компоненте исправляются на основании отчетов о проблеме в программном обеспечении, а изменения в связи с уточне-

нием требований осуществляются по запросам-отчетам, уточняющим требования архитектурного проекта и определяющим полный цикл работ, которые требуют повторения. Вся информация об отчетах, проблемах и запросах хранится в архиве сопровождения работ и проблем.

Данные методы и средства позволяют не только отражать историю изменения объектов БПО, но и автоматизированно управлять конфигурацией БПО: документировать возникшие проблемы, инициировать работы по их устранению, контролировать завершенность проблем, целостность сборок БПО, санкционированность и завершенность всех его изменений.

Верификация и подтверждение БПО. Выделено девять стандартных этапов верификации и подтверждения БПО, в рамках которых применены новые методы и средства: верификация требований, верификация архитектурного проекта, верификация средств разработки и тестирования БПО, верификация детального проекта, верификация кода, автономное тестирование, тестирование интеграции БПО, системное тестирование БПО, квалификационное тестирование ПО систем и БПО в целом в составе подсистем на инженерных моделях и летном изделии. Часть из этих методов была рассмотрена выше.

Главными достижениями по обеспечению верификации и подтверждения ПО подсистем и БПО в целом являются следующие:

- использование в составе средств тестирования верифицированных программных моделей бортового процессора, моделей устройств бортового комплекса управления, моделей поведения подсистем спутника, позволяющих в полном объеме провести автономное и системное тестирование БПО без использования реальной аппаратуры;

- высокий уровень пользовательского интерфейса средств тестирования, позволяющий проводить системное тестирование непосредственно проектантами логики функционирования подсистем изделия и изделия в целом;

- полное сохранение пользовательских интерфейсов средств тестирования при использовании моделей различных вычислительных платформ;

- использование не только диалоговых средств тестирования и отладки, но и языков и средств пакетного тестирования и отладки, позволяющих проектировать и программировать тесты по той же технологии, что и тестируемые программы БПО. Пакеты тестов позволяют автоматизировать регрессивное тестирование и постоянно улучшать набор тестов, а переносимость компонентов БПО и постоянство интерфейсов средств тестирования помогает сохранять актуальность архивов тестов для новых изделий;

- организация системного тестирования в соответствии с архитектурной декомпозицией БПО. Такой подход обеспечивает эффективное распределение ответственности за последовательность и уровни системного тестирования. В действующей технологии системное тестирование осуществляется последовательно на пяти уровнях: среды программного функционирования (на уровне операционной системы), среды программного управления, ПО системы в режимах системы, ПО системы в режимах космического аппарата и БПО в целом.

Средства разработки. Средства разработки, реализующие и поддерживающие перечисленные выше методы, представлены технологическим комплексом производства программ БПО (ТКПП), обеспечивающим разработку, включая автономное тестирование, и сопровождение компонентов БПО, и наземным отладочным комплексом БПО (НОК), обеспечивающим интеграционное и системное тестирование БПО, изготовление и сопровождение БПО конкретных изделий.

В составе ТКПП представлены следующие средства.

1. Мобильная кросс-система программирования (КСП) на языке Модуля-2, которая может быть адаптирована для различных целевых платформ, сохраняя все пользовательские интерфейсы. Кроме того, в дополнение к стандартным средствам, данная система предоставляет пакетный отладчик, позволяющий организовать регрессивное тестирование, средства измерения полноты автономного тестирования (по критериям С1 и С) и эксплуатационных характеристик компонентов, позволяющие гарантировать требуемый уровень качества компонент БПО. КСП создана в сотрудничестве с ИСИ СО РАН (г. Новосибирск) и ООО «Эксельсиор», функционирующего на базе этого института, соответствует мировому уровню средств разработки надежного ПО для встроенного применения, даже превосходя его по отдельным показателям.

2. Мобильные системы программирования команд управления конкретным изделием и логики функционирования систем изделия на проблемно-ориентированных командных языках. Проблемно-ориентированный интерфейс этих систем позволяет создавать прикладное программное обеспечение непосредственно проектантами систем.

3. Независимые от платформы базовые средства разработки БПО, решающие задачи хранения и сопровождения компонентов БПО, управления конфигурацией и управления качеством.

Все средства эффективно функционирует на любой ПЭВМ на платформе Intel Pentium IV в среде ОС Windows 2000 или 2003.

Наземный отладочный комплекс содержит БПО конкретного изделия, программную модель целевого БЦВК, модели поведения систем изделия, средства организации модельного вычислительного процесса и средства отладки. В состав НОК входит архив БПО изделий и средства изготовления носителей БПО. Данный комплекс является чисто программным средством и функционирует в той же инструментальной среде, что и среда разработки. Он

предоставляет проблемно-ориентированный пользовательский интерфейс, позволяющий проводить системное тестирование ПО систем и БПО в целом проектантами систем изделия. Интерфейс НОК унифицирован с интерфейсом средств заводских испытаний и средств управления при эксплуатации изделий.

Представленная технология и составляющие ее методы и средства успешно апробированы на более чем десяти типах спутников и на трех архитектурно существенно различных вычислительных платформах (CISC, RISC с различной эндианностью, разрядностью, способами адресации и представления данных) и в настоящее время используются в действующих проектах «Экспресс», «Экспресс-А», «СЕСАТ», «ГЛЮНАСС-М» и «Экспресс-АМ».

Технология зафиксирована в стандарте предприятия, который приведен в соответствие со стандартами Европейского космического агентства и апробирован в двух международных проектах.

Библиографический список

1. Князькин, Ю. М. Гарантии качества программного обеспечения встроенных ЭВМ / Ю. М. Князькин, А. А. Колташев // Проблемы обеспечения качества изделий в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / КГТУ. Красноярск, 1994.
2. Koltashev, A. A Practical Approach To Software Portability Based On Strong Typing And Architectural Stratification / A. Koltashev // Proceedings Lecture Notes in Computer Science (LNCS 2789): Joint Modular Languages Conference, Klagenfurt, Austria, 25–27 August 2003. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 2003.
3. Колташев, А. А. Технология переноса бортового программного обеспечения / А. А. Колташев // Открытые системы. 2004. № 4.
4. Колташев, А. А. Технология разработки и сопровождения мобильного программного обеспечения спутников связи / А. А. Колташев // Известия вузов. Приборостроение. 2004. № 4.
5. Колташев, А. А. Машинно-независимая технология разработки БПО / В. Д. Анисимов, А. А. Колташев // Результаты научно-практической деятельности ученых и инженеров ФГУП «Научно-производственное объединение прикладной механики имени академика М. Ф. Решетнева» в области прикладной космонавтики: юбил. сб. Красноярск, 2004.

A. N. Antamoshkin, A. A. Koltashev

SOFTWARE ENGINEERING ASPECTS FOR COMMUNICATION SATELLITE DESIGN

There is proposed conception and some methods which lead to essential growth of quality and efficiency of development and maintenance on-board communication satellite software.

О. А. Антамошкин

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОАТРИБУТИВНОГО МЕТОДА ДЛЯ ВЫБОРА СОСТАВА БОРТОВЫХ СИСТЕМ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ

Для многоуровневого выбора состава бортовых систем обмена информацией предлагается применить многоатрибутивный метод проектирования. Рассматривается алгоритм, реализующий данный метод.

Специфика проектирования бортовых систем обмена информацией спутников связи. При разработке сложных технических систем, к которым, несомненно, относятся и бортовые системы обмена информацией (БСОИ), следует четко представлять круг выполняемых проектных работ на соответствующих этапах и уровнях с использованием определенных методов проектирования.

Работы на этапах проектирования по форме аналогичны, однако есть специфичность этапов для бортовой ЭВА, в том числе и БСОИ, определяемая общими особенностями этих систем и особенностями их применения в системах управления (СУ), среди которых главными являются следующие:

- разнородность входящих блоков и устройств, а также абонентов СУ;
- работа в реальном масштабе времени;
- программируемая логика работы и многофункциональное назначение системы;
- возможность возникновения отказов, приводящих к изменению алгоритма функционирования (отказы функционирования);
- наличие взаимосвязанных требований по точности и скорости передачи информации.

При поэтапном проектировании после окончания каждого этапа происходит оценка полученных результатов путем их сравнения с требуемыми по техническому заданию. На этапе разработки технического предложения, как правило, оцениваются параметры обслуживания выбранной структуры. По итогам эскизного проекта определяются основные характеристики функционально-логической схемы БСОИ. На этапе разработки технического проекта конструкторские, технологические решения, принципиальные электрические схемы системы позволяют получить все характеристики системы обмена. На этапе испытаний осуществляется окончательная проверка принятых решений и происходит определение точных значений параметров БСОИ в условиях эксплуатации.

Уровни проектирования можно разделить на алгоритмический, структурный, функционально-логический, схемотехнический и конструкторско-технологический.

На алгоритмическом уровне решаются вопросы построения системы в целом, анализируются алгоритмы обмена информацией в СУ и проводятся работы по определению необходимых (а при возможности оптимальных) временных соотношений в циклограмме решения задач и обмена.

На структурном уровне рассматривается вся система, определяются принципы организации объекта проектирования; выбирается архитектура с решением вопроса о распределении функций аппаратных и программ-

ных средств системы; разрабатывается структурная схема БСОИ, т. е. определяются состав структурных блоков и способы их взаимодействия (связи между блоками), а также основы построения ПО; вырабатываются требования к параметрам основных структурных частей системы и при необходимости формируются частные технические задания (ТЗ) на их разработку.

На функционально-логическом уровне происходит детализация (техническая и алгоритмическая) принятых структурных решений: детализируются функции блоков структурной схемы; выбираются конкретные принципы организации устройств БСОИ; определяется необходимая функционально-логическая реализация структурных блоков и системы, характеристики которых удовлетворяют требованиям ТЗ; разрабатывается программное и микропрограммное обеспечение БСОИ.

На более низких уровнях проектирования разработка завершается оформлением принципиальных электрических схем устройств и системы в целом, конструкторско-технологических чертежей и другой документации, необходимой для начала производства системы.

Анализ содержания и специфики работ при проектировании БСОИ, задач уровней проектирования, а также взаимосвязанности работ по этапам и уровням показывает необходимость уделить особое внимание вопросам разработки БСОИ на структурном и функционально-логическом уровнях, так как именно на этих уровнях (в первую очередь на структурном) формируются решения, определяющие качество системы, содержание и направление работ на следующих уровнях проектирования. Следует отметить, что при проектировании систем на ИС, БИС, СБИС и микропроцессорах, т. е. на уровне корпусов функциональных элементов, задачи, решаемые на структурном, функционально-логическом и конструкторско-технологическом уровнях, тесно переплетены. Это объясняется тем, что существуют детерминированные решения по архитектуре в функционально законченных элементах (модулях) интегральных схем.

Можно считать, что процесс проектирования сложных систем базируется на трех основных компонентах: методе проектирования, способе принятия решений и совокупности показателей качества, используемых для оценки решений.

В настоящее время проектирование сложных иерархических систем, в том числе и систем обмена информацией, практически невозможно без использования систем автоматизированного проектирования. При этом, с одной стороны, используемый метод проектирования должен позволять применять СППР, а с другой – СППР должен непосредственно учитывать пользовательские аспек-

ты и обеспечивать законченность процесса «проектирование – производство».

На основании анализа возможностей наиболее распространенных СППР различного назначения можно сделать следующие выводы:

- структурному уровню проектирования уделяется недостаточное внимание;
- ориентация на характеристики ТЗ в процессе принятия решения (а не на показатели качества и стоимостные характеристики) упрощает работу пользователя, но может привести к снижению эффективности проектирования и его неэкономичности;
- ввиду незавершенности (нет строгого сквозного процесса проектирования) имеющиеся СППР следует считать развитыми специализированными системами моделирования;
- разработанные СППР в недостаточной степени ориентированы на создание БСОИ и применять их для разработки таких специфических систем неэффективно и экономически невыгодно.

Большинство СППР ориентированы на использование метода сравнительного анализа в определенной последовательности действий:

- выбор алгоритма функционирования проектируемого объекта;
- формирование множества схем устройств, реализующих выбранный алгоритм функционирования;
- последовательное сравнение вариантов схем по каждой заданной в ТЗ характеристике и исключение после каждого сравнения тех вариантов структур, которые не удовлетворяют требованиям ТЗ;
- выбор структуры по результатам оценки с помощью обобщенного критерия.

Метод сравнительного анализа позволяет определить допустимый вариант реализации заданного к проектированию устройства, но при этом имеет следующие недостатки: в большинстве случаев на практике решение принимается не по совокупности показателей качества, учитывающей технические характеристики проектируемого устройства и аналогичные параметры класса таких устройств, а по конкретным характеристикам и, как правило, неавтоматизированным способом, что снижает эффективность разработки. Так как при этом на каждом шаге принятия решений по определенному параметру выбирается группа вариантов устройства для дальнейшего рассмотрения, то возможна потеря варианта реализации объекта проектирования, наилучшего по критерию оценки следующих этапов анализа. Этот способ не позволяет создавать новые технические решения, поскольку ориентирован на оценку эвристически заданного множества конкурирующих вариантов.

К наиболее распространенным методам проектирования относятся анализ и синтез, которые могут быть использованы в качестве единого метода выполнения проектных операций для всех уровней разработки. Однако применение на практике полного синтеза для сложных систем в настоящее время затруднено, а сравнительный анализ не обладает всеми качествами, необходимыми для обеспечения сквозного многоуровневого проектирования.

В качестве эффективного и практически приемлемого единого метода выполнения проектных операций це-

лесообразно использовать метод направленного выбора. Для построения множества оптимальных альтернатив на всех этапах проектирования автор предлагает использовать метод учета неопределенности и субъективности оценок.

Метод учета неопределенности и субъективности оценок при проектировании бортовой системы передачи информации. Рассмотрим модель и метод принятия решения на полученном множестве альтернатив, соответствующих различным составам бортовой системы передачи информации, в котором учитывается не только неопределенность в оценках эксперта, но и его интуитивные склонности относительно реальных характеристик атрибутов (критериев) и их специфики.

Предлагаемый метод позволяет выбрать в качестве оптимальной альтернативу, которая минимизирует взвешенное расстояние от назначенной «идеальной точки» для размытой и интуитивной составляющих [6]. Таким образом, данный метод комбинирует оценки каждого значения атрибута при отсутствии полной информации о предпочтениях и субъективные оценки относительно важности всех атрибутов.

Допустим, имеется m альтернатив, представляющих собой различные структуры БСОИ, из которых необходимо сделать выбор. Каждому выбору соответствует n значений атрибутов. В реальной задаче выбора такими атрибутами будут являться надежность системы, стоимость, быстродействие и т. п. Для k -й альтернативы существует $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$, где $x_i^{(k)}$ – значение i -го атрибута, если k -я альтернатива выбрана. Будем обозначать через $A^{(k)}$ k -ю альтернативу, однозначно определяющую $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$ и соответствующую одному из вариантов состава бортовой системы передачи информации.

Согласно концепции «идеальной точки» обозначим через $A^* (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ «идеальную» альтернативу, для которой x_i^* предпочтительней $x_n^{(k)}$ для любых k и i . Отметим, что некоторые значения x_i^* могут и не соответствовать значениям альтернатив $A^{(k)}$ рассматриваемого множества.

Обозначим субъективную оценку относительной важности каждого i -го атрибута с помощью нечеткого множества H_i :

$$X_i = \{x_1^{(k)}: 1 \leq k \leq m\} \cup \{x_i^*\},$$

где x_i^* в общем случае не является частью множества $\{x_i^{(k)}: 1 \leq k \leq m\}$. H_i описывается своей характеристической функцией вида

$$f_{H_i}: X_i \rightarrow [0, 1]. \quad (1)$$

Таким образом, $f_{H_i}(x_i^{(k)})$ характеризует предпочтительность $A^{(k)}$ по i -му атрибуту. Очевидно, что $f_{H_i}(x_i^*) = 1$, так как x_i^* – наилучшее возможное значение i -го атрибута. В некоторых случаях может быть использовано предварительно определенное соотношение для нахождения значений $f_{H_i}(x_i^{(k)})$, например:

$$\text{если } 0 < x_i^{(k)} \leq x_i^* \forall k, \text{ то } f_{H_i}(x_i^{(k)}) = x_i^{(k)}/x_i^*;$$

$$\text{если } 0 < x_i^* \leq x_i^{(k)} \forall k, \text{ то } f_{H_i}(x_i^{(k)}) = x_i^*/x_i^{(k)}.$$

Как правило, проектировщик хотел бы использовать свои собственные субъективные знания на этапе назначения коэффициентов сатисфакции для i -го значения атрибута, обеспеченного $A^{(k)}$.

Выбор альтернативы представляет собой попытку минимизировать расстояние между $A^{(k)}$ и A^* , которое, несомненно, является функцией субъективных предпочтений проектировщика, характеризующих его квалификацию, опыт практической работы, уровень знаний о предметной области, а также зависит от уровня информированности о представленном для выбора реальном множестве альтернатив в конкретной ситуации [1]. Другими словами, расстояние между двумя альтернативами, принимая во внимание относительную важность, назначенную для каждого атрибута, должно быть минимально. При этом благодаря сгенерированным коэффициентам в процессе выбора учитывается неопределенность, присущая данной задаче. Очевидно, что если для всех $x_i^{(k)}$ ($1 \leq k \leq m$) на этапе принятия решения информация о предпочтительности недоступна (скрыта), то неопределенность по i -му атрибуту становится относительно высокой. Однако высокий уровень для $x_i^{(k)}$ и низкий для $x_i^{(l)}$, где $k \neq l$, снижает неопределенность по i -му атрибуту.

Разрабатывая решающий алгоритм, употребим наиболее часто используемую меру неопределенности – энтропию, обозначив через p_i вероятностную функцию распределения:

$$-\sum_{i=1}^m p_i \ln p_i.$$

Чтобы выразить нечеткое множество H_i через распределение вероятностей, установим

$$p_i^{(k)} = f_{H_i}(x_i^{(k)}) / \sum_{l=1}^m f_{H_i}(x_i^{(l)}),$$

где $p_i^{(k)}$ – оценка степени принадлежности $x_i^{(k)}$ нечеткому множеству H_i . Так что теперь мы можем определить неопределенность по i -му атрибуту как функцию энтропии:

$$e_i = -M \sum_{k=1}^m p_i^{(k)} \ln p_i^{(k)}, \quad (2)$$

где M – нормирующая константа, допускающая максимальное значение e_i , равное 1. Фактически e_i максимально, если $p_i^{(k)} = 1/m$, следовательно $M = 1/\ln m$ и $0 \leq e_i \leq 1$. Общая неопределенность получается путем суммирования неопределенностей по каждому атрибуту:

$$E = \sum_{i=1}^n e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m p_i^{(k)} \ln p_i^{(k)}.$$

В расстоянии между двумя альтернативами весовые коэффициенты, зависящие от неопределенности, будут малы, если неопределенность высока. Высокое значение неопределенности относительно некоторого i -го атрибута означает, что довольно большое количество альтернатив имеет близкие по значению коэффициенты сатисфакции относительно этого i -го атрибута и поэтому решение о выборе некоторой альтернативы не будет существенно зависеть от этого атрибута. Другими словами, i -й атрибут, не отличающийся по большинству альтернатив, имеет более существенное значение для принятия решения. Определим коэффициент сатисфакции:

$$\bar{S}_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^n (1 - e_i)} = \frac{1 - e_i}{n - E}, \quad 0 < i \leq n. \quad (3)$$

Отметим, что когда неопределенность, соответствующая i -му атрибуту, высока, то e_i близко к 1 и коэффициент \bar{S} мал.

Предлагаемая ниже процедура комбинирует нечеткость, характеризующую полученные коэффициенты сатисфакции, и субъективную составляющую, присущую конкретному проектировщику на этапе принятия решения о составе бортовой системы.

Пусть w_i – относительные веса по важности, назначенные ЛПР i -му атрибуту априори. Тогда комбинированный весовой коэффициент можно определить по выражению

$$S_i = \frac{\bar{S}_i w_i}{\sum_{i=1}^n \bar{S}_i w_i}, \quad 0 < i \leq n. \quad (4)$$

Мера того, насколько удалена $A^{(k)}$ от идеальной альтернативы A^* , соответствует тому, насколько значения атрибутов $A^{(k)}$ удовлетворяют субъективным целевым представлениям проектировщика. Введем понятие дополнения нечеткого множества H_i , которое будем обозначать U_i , и для которого выполняется $f_{U_i}(x_i^{(k)}) = 1 - f_{H_i}(x_i^{(k)})$.

Итак, если необходимо вычислить, насколько удалены друг от друга альтернативы $A^{(k)}$ и A^* по i -му атрибуту, то это можно увидеть по степени неудовлетворенности проектировщика значением i -го атрибута для $A^{(k)}$:

$$Dis^{(i)}[A^*, A^{(k)}] = S_i f_{U_i}(x_i^{(k)}) \quad (5)$$

и тогда

$$Dis[A^*, A^{(k)}] = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Dis^{(i)}[A^*, A^{(k)}])^2}. \quad (6)$$

Здесь значение $Dis^{(i)}$ характеризует функцию различимости (*distinguishability function*) по каждому отдельно i -му атрибуту, а $Dis(A^*, A^{(k)})$ соответствует среднеквадратичному отклонению $Dis^{(i)}$. Нашей целью является выбор альтернативы $A^{(k_0)}$, которая максимально близка к A^* :

$$Dis[A^*, A^{(k_0)}] = \min_k Dis[A^*, A^{(k)}]. \quad (7)$$

Можно ввести дополнительные метрики, в выборе которых заинтересован проектировщик, например:

$$Dis_{(1)}[A^*, A^{(k)}] = \sum_{i=1}^n S_i f_{U_i}(x_i^{(k)}) \quad (8)$$

или

$$Dis_{(2)}[A^*, A^{(k)}] = \max_i \{S_i f_{U_i}(x_i^{(k)})\}. \quad (9)$$

Алгоритм выбора недоминируемого решения, основанный на субъективных предпочтениях проектировщика. Для выбора оптимального состава БСОИ на множестве недоминируемых альтернатив применяют описанный выше метод учета неопределенности и субъективности оценок. Алгоритм, реализующий данный метод, выглядит следующим образом.

Шаг 1. Назначение идеальной альтернативы. Предоставление проектировщику всех имеющихся недоминируемых альтернатив.

Шаг 2. Назначение проектировщиком $f_{H_i}(x_i^{(k)})$, характеризующих предпочтительность k -й альтернативы по i -му атрибуту для $\forall k, i$ согласно (1). Назначение весовых коэффициентов w_i , определяющих относительную важность i -го атрибута.

Шаг 3. Определение наилучшей альтернативы путем выполнения следующих вычислительных процедур:

– расчет частных энтропий по каждому атрибуту $e_i \forall i$ согласно (2);

- расчет коэффициентов сатисфакции по каждому атрибуту $S_i \forall i$ согласно (3);
- расчет весовых коэффициентов $S_i \forall i$, комбинирующих нечеткость и субъективную оценку согласно (4);
- расчет значений $\text{Dis}^{(i)}$ для $\forall i$, определяющих расстояние между k -й альтернативой и идеальной альтернативой по i -му атрибуту согласно (5);
- расчет $\text{Dis}(A^*, A^{(k)})$ согласно (6) (или (8) или (9));
- определение наилучшей альтернативы путем минимизации $\text{Dis}(A^*, A^{(k)})$ согласно (7).

Шаг 4. Предоставление проектировщику значения $\text{Dis}(A^*, A^{(k)})$ и соответствующего ему решения. Если полученное решение удовлетворяет проектировщика, то завершаем вычисления, иначе нужно возвращаться на **Шаг 2**.

Исследование влияния мощности множества недоминируемых решений на результат работы метода. Согласно представленному методу осуществляется выбор среди нескольких альтернатив, основываясь на значениях следующих параметров, заданных проектировщиком:

- предпочтения альтернатив по каждому критерию (f_{H1} и f_{H2});
- весовые коэффициенты критериев (w_1 и w_2).

С помощью описанного метода будут получены недоминируемые решения, из которых можно сформировать множества различной мощности. При необходимости в процесс формирования множества недоминируемых решений может включаться несколько проектировщиков.

Описанный алгоритм выделяет из этого множества одно решение, основываясь на индивидуальных предпочтениях проектировщика.

Были исследованы множества недоминируемых решений мощности $M = 5, 8, 10, 15, 20$, записанные в виде графиков и таблиц. График облегчает для проектировщика назначение коэффициентов предпочтительности альтернатив, необходимых для работы алгоритма.

Анализ результатов исследования. Проведенное исследование работы многоатрибутивного метода учета неопределенности и субъективности оценок показывает, с одной стороны, что увеличение мощности множества недоминируемых решений, предоставляемое проектировщику, может вести к улучшению решения. С другой стороны, его увеличение нецелесообразно тогда, когда проектировщик не в состоянии дать непротиворечивую оценку всех предоставленных ему альтернатив.

После приведенных расчетов видно, что оптимальная мощность составляет 8...10 альтернатив, предоставляющих проектировщику достаточно большой выбор и содержащих решение, способное удовлетворить его запросы.

Заключение. При проектировании БСОИ выделение множества недоминируемых альтернатив не является удовлетворительным решением. Это связано с тем, что при достаточно большом исходном множестве вариан-

тов архитектур БСОИ множество недоминируемых альтернатив оказывается недопустимо большим для того, чтобы проектировщик был в состоянии осуществить окончательный выбор самостоятельно. Таким образом, выделение множества недоминируемых альтернатив можно рассматривать лишь как предварительный этап выбора оптимального состава системы.

Для полного и окончательного решения этой задачи потребуются некоторая дополнительная информация, которую придется получить от эксперта. Это может быть информация о критериях отбора, о самих сравниваемых структурах БСОИ и т. д. Предложенный в статье многоатрибутивный метод способен с помощью этой информации сузить множество альтернатив выбора и гарантировать проектировщику, что ни один из вариантов, представляющих для него интерес, не будет потерян в процессе поиска оптимального состава БСОИ.

Немаловажен и тот факт, что данный метод поддается автоматизации, которая существенно сокращает время построения множества оптимальных альтернатив состава БСОИ на всех стадиях проектирования, а окончательный выбор окончательной альтернативы будет осуществляться в дальнейшем при помощи ЛПР.

Библиографический список

1. Батищев, Д. И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Д. И. Батищев, Д. Е. Шапошников; ИПФ РАН. Нижний Новгород, 1994. 92 с.
2. Ковалев, И. В. Параллельные процессы в информационно-управляющих системах. Формирование и оптимизация: моногр. / И. В. Ковалев, Р. Ю. Царев, Ю. Г. Шиповалов; под ред. А. В. Медведева; НИИ СУВПТ. Красноярск, 2001. 143 с.
3. Михалевич, В. С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевич, В. Л. Волкович. М.: Наука, 1982. 286 с.
4. Харченко, В. С. О проектировании гарантированных микропроцессорных систем и комплексов / В. С. Харченко, С. В. Терещенко // Тез. докл. 2-го Всесоюз. совещ. по автоматизирован. проектированию программ. обеспечения систем управления движущимися объектами. Харьков, 1989. С. 218–219.
5. Чжу, У. У. Копирование и размещение программных модулей в системе распределенной обработки в реальном времени / У. У. Чжу, Ц. К. Лян // ТИИЭР. 1987. Т. 75, № 5. С. 23–44.
6. Shipley, M. F. A Decision Making Model for Multi-Attribute Problems Incorporating Uncertainty and Bias Measures / M. F. Shipley, A. de Korvin, R. Obid; University of Houston-Downtown. Houston, 1990.

О. А. Antamoshkin

MULTIATTRIBUTIVE METHOD DEVELOPMENT FOR DESIGNING ONBOARD SYSTEMS OF INFORMATION TRANSFERING

There is offered to use multiattributive design method for multilevel choice of onboard information transferring system. Algorithm realizing given method is considered.

А. Б. Базилевский, М. В. Лукьяненко

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рассмотрены различные условия эксплуатации солнечной батареи. Проведен их сравнительный анализ. По результатам исследования энергетических возможностей солнечной батареи даны рекомендации для разработки систем электроснабжения космических аппаратов.

Подавляющее большинство систем электроснабжения (СЭС) современных космических аппаратов (КА) как искусственных спутников Земли, так аппаратов дальнего космоса строится на основе солнечных батарей (СБ). Очевидно, что в зависимости от типа КА будут существенно отличаться и условия эксплуатации СБ. С увеличением единичной бортовой мощности возрастают требования как к КА в целом, так и к СЭС в частности. При этом одной из первостепенных задач ставится задача рационального использования энергии генерируемой СБ.

Современная СЭС КА, имеющая в своем составе энергопреобразовательное оборудование, предназначенное для стабилизации напряжения на шинах нагрузки и согласования СБ с буферным источником-накопителем и нагрузкой, позволяет обеспечить высокую эффективность отбора мощности от СБ в широком диапазоне изменения ее выходных параметров.

Вместе с тем, при разработке СЭС для новых КА уже на ранних этапах проектирования приходится выбирать из достаточно большого количества возможных вариантов только один.

В настоящее время в СЭС КА применяются две структуры с последовательным и параллельным включением регулятора СБ, каждая из которых может реализовать различные способы регулирования мощности солнечной батареи. Сама СБ может иметь различные конфигурации и способы ориентации, следовательно и различные средние мощности в зависимости от параметров орбиты и соотношения освещенного и теневого участков.

Имеющаяся в отечественной и зарубежной литературе информация относится к конкретным условиям эксплуатации и конкретной конфигурации СБ, что затрудняет объективную оценку того или иного варианта в зависимости от планируемых условий функционирования, поэтому проведение анализа энергетических возможностей СБ при различных условиях эксплуатации в общем виде представляет большой практический интерес. Указанный анализ целесообразно проводить методом моделирования на основе энергетической модели СБ, удовлетворяющей требованию заданной точности [1]. Необходимо отметить, что данная модель не учитывает ресурсную деградацию СБ под действием условий космического пространства. Однако деградация, приводящая к снижению удельных характеристик и деформации вольт-амперной характеристики (ВАХ), будет иметь место независимо от структуры СЭС и способа регулирования мощности СБ, и при равных ресурсах и орбитах ее можно считать практически одинаковой. В отличие от энергобалансной задачи, где решающую роль играет абсолютный

спад мощности СБ, при анализе ее энергетических возможностей имеет место относительное изменение положения характеристических точек на ВАХ, а поскольку зависимость $U_{x.x.}(C,t)$, $I_{к.з.}(C,t)$, $i(C,t)$, $j(C,t)$, где $U_{x.x.}$ – напряжение холостого хода, $I_{к.з.}$ – ток короткого замыкания, $i = \frac{I_{опт.}}{I_{к.з.}}$, $j = \frac{U_{опт.}}{U_{к.з.}}$, $I_{опт.}$ и $U_{опт.}$ – собственно ток и напряжение в точке наибольшей мощности, сохраняют свой вид, следовательно принятое допущение можно считать правомерным.

Предпосылкой для проведения такого анализа является полученное по результатам экспериментальных исследований заметное различие в мощностях, отдаваемых СБ в зависимости от ее температуры и способа регулирования [1] (рис. 1).

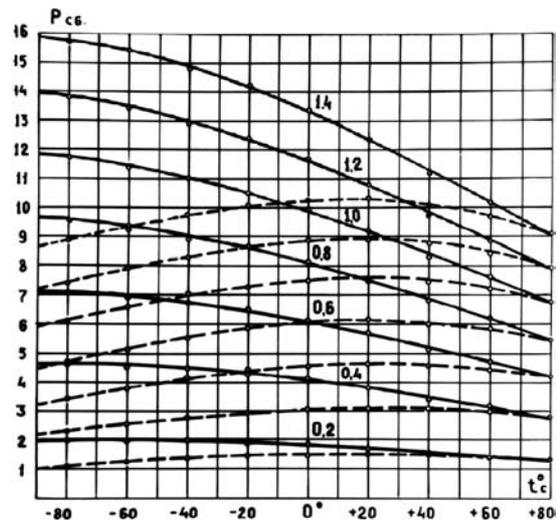


Рис. 1. Графики мощностей, отдаваемых солнечной батареей в зависимости от ее температуры и способа регулирования

Поскольку количество последовательно соединенных элементов в СБ выбирается таким, чтобы при максимальной равновесной температуре и заданном ресурсе работы напряжение в точке наибольшей мощности было равно установленному ГОСТом напряжению бортовой сети, то при любой другой температуре (ниже равновесной) и в начале срока функционирования мощность СБ в упомянутой точке будет больше, также будет больше и напряжение, ей соответствующее.

В наибольшей степени непостоянство удельной мощности солнечного излучения и, как следствие, нестационарность теплового режима СБ (за исключением термостабилизированной расположенной на каркасе) имеет место для КА, работающего на низкой орбите. При этом

текущее значение освещенности и температуры изменяются в следующих пределах: $0 \leq P_{уд} \leq C$, $T_{p \min} < T_{сб} < T_{p \max}$, где $P_{уд}$ – удельная мощность излучения, падающего на СБ, Вт/м², C – солнечная постоянная, $C = 1\,396$ Вт/м²; $T_{сб}$ – текущая температура СБ, К; $T_{p \min}$ и $T_{p \max}$ – минимальная и максимальная равновесные температуры СБ, К.

Поскольку теплообмен в космосе осуществляется излучением, то наиболее значимым фактором, влияющим на текущую температуру СБ, является лучистый поток от Солнца. Для низких орбит ($H < 1\,500$ км) нельзя пренебрегать и тепловым воздействием планеты, вблизи которой находится КА. Кроме того, на температуру СБ влияют элементы конструкции самого аппарата, находящиеся вблизи панелей.

Исходя из вышеизложенного, дифференциальное уравнение теплового режима СБ можно записать с помощью выражения

$$C_m \frac{dT}{dt} = C \cdot \varphi_c \cdot \alpha_c + \Phi_{01} \cdot \varphi_1 \cdot \alpha_1 + \Phi_{02} \cdot \varphi_2 \cdot \alpha_2 + \Phi_k - \frac{P_H}{F} - \sigma \cdot T^4 (\epsilon_n + \epsilon_t), \quad (1)$$

где C_m – удельная теплоемкость СБ, Дж / (м² · град), T – температура СБ, К; τ – время, с; $\varphi_c = \cos \gamma$, γ – угол между вектором \vec{S} Солнца и нормалью к СБ; $\Phi_{01} = \frac{1 - A_{ср.}}{4}$ – собственное инфракрасное излучение Земли, Вт/м²; $\Phi_{02} = A_{ср.} \cdot C$ – отраженная от Земли солнечная радиация; $A_{ср.}$ – среднее значение альбедо Земли, равное 0,37; Φ_k – тепловое воздействие элементов конструкции КА, Вт/м²; φ_i – угловой коэффициент i -го излучения; α_i – коэффициент поглощения поверхности, подвергающейся воздействию i -го излучения; $\frac{P_H}{F}$ – отводимая электрическая мощность с поверхности F , Вт/м²; $\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8}$ Вт / (м² · град⁴) – постоянная Больцмана; ϵ_n и ϵ_t – коэффициенты черноты соответственно лицевой и тыльной сторон СБ.

Очевидно, что коэффициенты α_i также различны для лицевой и тыльной сторон СБ и меняют свои значения для различных спектров воздействующих излучений. Вычисление коэффициентов φ_1 и φ_2 проводилось по известной методике [2].

На результаты вычислений существенное влияние оказывает точность, с которой определены значения α_n , α_t , ϵ_n , ϵ_t и C_m , получаемые экспериментально, поэтому усредненные и паспортные значения уточнялись для случая, когда инфракрасным излучением можно пренебречь. Этому условию удовлетворяет КА круговой орбиты с высотой $H = 20\,000$ км и ориентированной СБ.

Данные, передаваемые через канал телеметрии, о динамике теплового процесса при прохождении теневого участка, а также о напряжении холостого хода коммутируемой СБ при выходе из тени, уточнялись до получения требуемой сходимости, после чего они использовались в дальнейших расчетах: $C_m = 8\,000$ Дж / (м² · град), $\epsilon_n = 0,81$, $\epsilon_t = 0,91$, $\alpha_n = 0,86$, $\alpha_t = 0,15$.

Для непосредственных вычислений выражение (1) приводят к виду

$$\frac{dT}{dt} = (T_p^4 - T_{сб}^4) \cdot \frac{\sigma(\epsilon_n + \epsilon_t)}{C_m}, \quad (2)$$

где T_p – равновесная температура, $T_{p \min} = -100$ °С, $T_{p \max} = +55$ °С.

Выражение для равновесной температуры имеет вид

$$T_p^4 = \left(C \cdot \varphi_c \cdot \alpha_c + \Phi_{01} \cdot \varphi_1 \cdot \alpha_1 + \Phi_{02} \cdot \varphi_2 \cdot \alpha_2 + \Phi_k - \frac{P_H}{F} \right) \cdot \frac{1}{\sigma \cdot (\epsilon_n + \epsilon_t)}. \quad (3)$$

Вычисляя зависимость $\varphi_c(\tau)$, $\varphi_1(\tau)$, $\varphi_2(\tau)$ и используя (2) и (3), определяют текущую температуру СБ.

Для повышения точности расчетов необходимо вычислить влияние геометрии объекта (взаимное затенение при данной конфигурации СБ) и параметров орбиты на относительное время освещенного и теневого участков.

Рассмотрим КА, вращающийся по круговой орбите в диапазоне высот $H = 200 \dots 20\,000$ км и имеющий СБ, расположенную на термостатированном каркасе и на откидных панелях (рис. 2). Это позволит одновременно учесть и сравнить количественно эффективность работы СБ различных конфигураций, с различной температурой и для разных способов регулирования, а также определить целесообразность выбора конкретного варианта и его энергетические возможности.

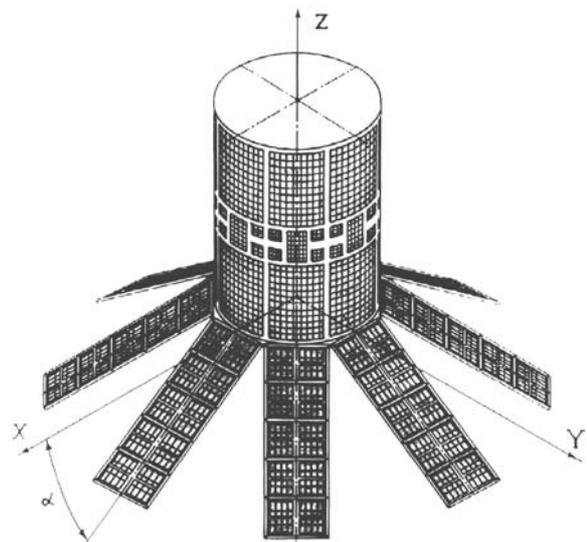


Рис. 2. Космический аппарат с солнечной батареей на термостатированном каркасе и на откидных панелях

Продольной осью Z космический аппарат ориентирован на центр Земли, следовательно по отношению к Солнцу (\vec{S}) СБ будет неориентированной. При моделировании геометрии СБ учитывалось, что при изменении угла β между продольной осью Z и направлением \vec{S} возможны следующие граничные условия:

1) $\beta = 0$ – освещены только откидные панели;

2) $0 < \beta \leq (90^\circ - \alpha)$ – часть панелей затенена корпусом КА, где α – угол между плоскостью, перпендикулярной Z и откидными панелями (рис. 3). Необходимо определить границу тени, отбрасываемой корпусом, что достигается проекцией его образующих по направлению \vec{S} (рис. 3, а);

3) $(90^\circ + \alpha) \leq \beta < 180^\circ$ – затенение корпуса КА панелями. Необходимо определить границу теней, отбрасываемых панелями на корпус, аналогично п. 2 (рис. 3, б);

4) затененные части СБ (рис. 3, а, б) заштрихованы. Указанные границы определяются с помощью известных методов аналитической геометрии и в данной работе подробно не рассматриваются.

Для оценки мощности, генерируемой СБ в условиях частичного затенения, необходимо исходить из коммутационной схемы как в пределах отдельных секций, состоящих из групп модулей, так и секций, соединенных между собой через развязывающие диоды или без них (многосекционная система преобразования).

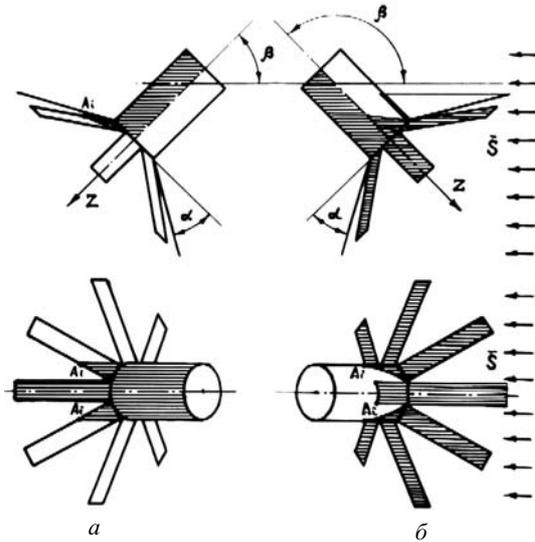


Рис. 3. Границы теней, отбрасываемых корпусом космического аппарата и панелями солнечной батареи

Солнечная батарея состоит из 16 секций, расположенных на корпусе КА (8 секторов, в каждом из которых находится по 2 секции с коммутацией элементов, соединенных последовательно вдоль образующей цилиндра) и 8 откидных панелей (рис. 4).

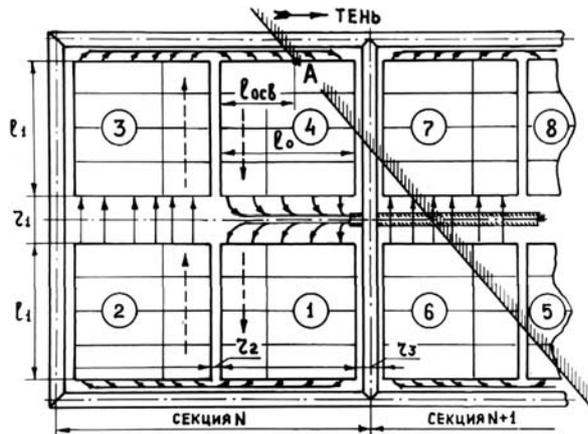


Рис. 4. Схема коммутации солнечной батареи:
 1, 2, 3, 4 – группы модулей в N -й секции, частично затененной; r_1, r_2, r_3 – расстояния между группами; l_0 – длина группы модулей (в том направлении солнечные элементы в группе соединены параллельно); l_1 – ширина группы модулей; $l_{осв}$ – длина освещенной части элементов, соединенных параллельно (генерирующих ток); A – максимально удаленная точка пересечения границы тени группой

Координаты точки A можно легко определить, поэтому задача сводится к нахождению величины тока короткого замыкания частично затененной секции:

$I_{к.з.т.} = r \cdot I_{к.з.о.}$, где $I_{к.з.т.}$ – ток короткого замыкания частично затененной секции; $I_{к.з.о.}$ – ток короткого замыкания полностью освещенной секции; $r = \frac{l_{осв.}}{l_0}$ – относительная освещенная длина.

Найденный ток суммируют с током короткого замыкания полностью освещенных секций, и вольт-амперную характеристику панели вычисляют по формуле [1]

$$I = I_{к.з.} \cdot [1 - e^{-r(u)}].$$

При этом принимаем допущение, что температура затененной части панели равна температуре освещенной части, т. е. освещенная часть СБ работает на параллельно подключенную затененную ее часть. Результирующая ВАХ деформируется в области холостого хода на соответствующую величину DI (рис. 5).

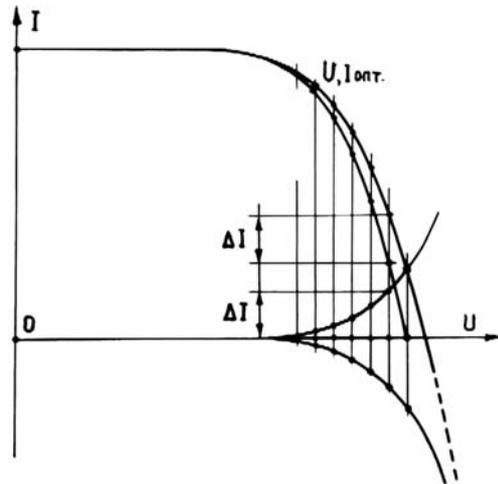


Рис. 5. Результирующая вольт-амперная характеристика солнечной батареи

Экспериментальные исследования позволили оценить потери мощности при указанном допущении, равном 4...5 %, в пределах одной секции в энергетически незначимой области ВАХ. В области точки наибольшей мощности $U_{опт.}, I_{опт.}$ потери резко уменьшаются, а в пределах СБ в целом становятся пренебрежительно малыми. Поскольку затененная часть СБ имеет температуру ниже, чем освещенная, принятое допущение можно считать корректным.

Оценка влияния параметров орбиты на энергетические характеристики СБ проводилась с помощью геометрической модели (рис. 6). Для круговых орбит общепринятый в траекторных измерениях набор параметров можно свести к двум: высоте орбиты H и углу η между вектором солнечного излучения \vec{S} и плоскостью орбиты КА.

В процессе движения КА в зависимости от H и η изменяется и относительное время тени (в пределах угла φ_T , образуемого пересечением плоскости орбиты и теневого цилиндра Земли).

По формуле $\Theta_0 = \arcsin \frac{R + H_\alpha}{R + H}$, где Θ_0 – угол обзора; H_α – высота отражающего слоя атмосферы (10...12 км); R – радиус Земли, определяют влияние высоты орбиты H на угол Θ_0 . В пределах угла обзора Θ_0 на КА воздействует инфракрасное излучение планеты, а при полете над освещенной фазой – альbedo Земли.

Результаты исследований энергетических возможностей СБ приведены на рис. 7 в зависимости от высоты орбиты при $\eta = 0^\circ$ (на максимальной тени). Максимальная тень взята вследствие того, что съем энергии с СБ в этом случае будет минимальным. Это соответствует наиболее тяжелому режиму работы СЭС, при этом тепловой режим СБ характеризуется наибольшими колебаниями температуры.

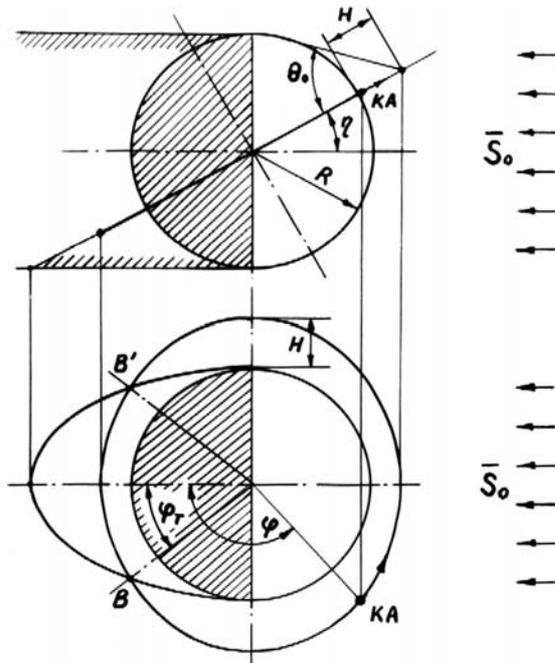


Рис. 6. Влияние высоты орбиты на угол обзора

Суммарная мощность, снимаемая с СБ при экстремальном регулировании для высоты орбиты 1 500 км в зависимости от угла наклона орбиты η , приведена на рис. 8.

Для оценки эффективности использования того или иного способа регулирования мощности СБ построены

кривые среднесуточной относительной мощности $P_{с.с.отн.}$ (рис. 9):

$$P_{с.с.отн.} = \frac{P_{с.с.} \cdot T_{обр.}}{T_{осв.}},$$

где $P_{с.с.}$ – среднесуточная мощность; $T_{осв.}$ – время освещенного участка; $T_{обр.}$ – время обращения КА.

Последовательная структура с законом регулирования по напряжению занимает промежуточное положение между кривыми 1 и 2 (рис. 10), причем заранее точно установить относительную снимаемую мощность с СБ невозможно. В этом случае, чтобы точно определить энергетические возможности СБ, необходимо моделировать энергобаланс в конкретной системе при известном сеансном расписании нагрузок и с учетом состояния аккумуляторной батареи.

Таким образом, при использовании термостатированной (в том числе и ориентированной) СБ различие в относительной мощности составляет 2,5...3 %, что позволяет считать все известные структуры СЭС КА и способы регулирования равноценными. Энергетически более эффективной при использовании неориентированной нетермостатированной СБ является структура СЭС с последовательным включением регулятора, реализующая закон управления по мощности. Выигрыш, получаемый при этом на круговой орбите и максимальной тени, достигает на высоте орбиты 200...300 км 32...33 % по сравнению со схемой с параллельным регулятором (стабилизатором напряжения СБ) и с высоты 800 км до 20 000 км уменьшается до 17 %.

Библиографический список

1. Исследование статических характеристик фотопреобразователей: отчет по НИР. 1984. 43 с. № ГР 01.83.0004550. Инв. № 0284.0041482.
2. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / под ред. Г. И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 380 с.

A. B. Bazilevsky, M. V. Lukjanenko

ANALYSIS OF POWER CAPABILITIES OF SOLAR BATTERIES UNDER DIFFERENT OPERATIONAL CONDITION

Different operational conditions of solar batteries are considered. Comparative analysis is performed. Recommendation for designers of space ship power supply systems are developed based on results of research of power capabilities of solar batteries.

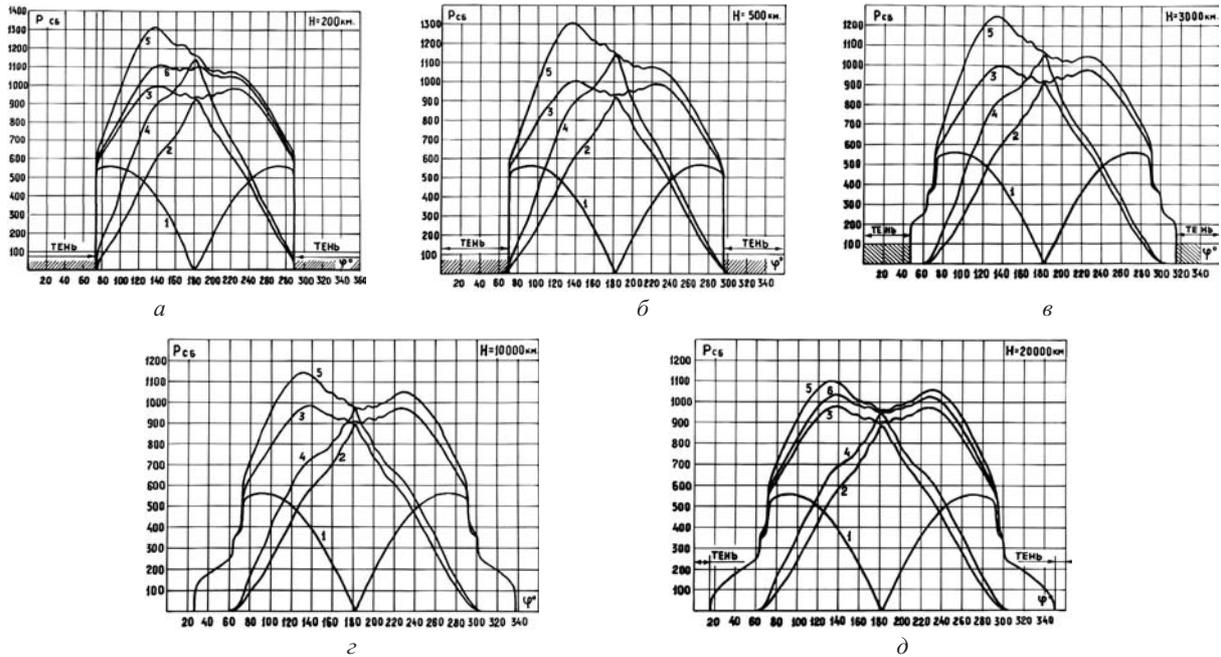


Рис. 7. Результаты моделирования энергетических возможностей солнечной батареи в зависимости от высоты орбиты H при $\eta = 0^\circ$: а – $H = 200$ км; б – $H = 500$ км; в – $H = 3\,000$ км; г – $H = 10\,000$ км; д – $H = 20\,000$ км; 1 – текущая мощность, снимаемая с термостатированного каркаса (остается неизменной при любом способе регулирования); 2 – текущая мощность, снимаемая с откидных панелей при параллельном включении регулятора СБ; 3 – суммарная мощность СБ; 4 – текущая мощность, снимаемая с откидных панелей при экстремальном регулировании; 5 – соответствующая суммарная мощность СБ; 6 – текущие суммарные мощности при регулировании СБ по напряжению ($U_{СБ} = 29$ В) с последовательным включением регулятора для высот 200, 20 000 км

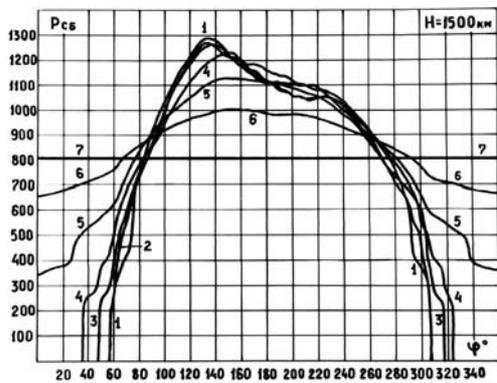


Рис. 8. Графики суммарной мощности, снимаемой с солнечной батареи при экстремальном регулировании, в зависимости от угла наклона орбиты: $\eta = 0^\circ$ (кривая 1); $\eta = 15^\circ$ (кривая 2); $\eta = 30^\circ$ (кривая 3); $\eta = 45^\circ$ (кривая 4); $\eta = 60^\circ$ (кривая 5); $\eta = 45^\circ$ (кривая 6); $\eta = 90^\circ$ (кривая 7).

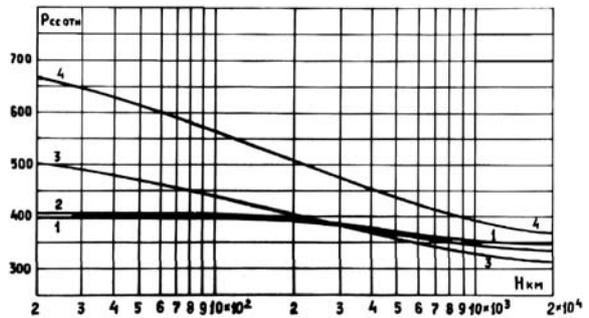


Рис. 9. Графики среднесуточной относительной мощности солнечной батареи при различных способах регулирования в зависимости от высоты орбиты: 1 – относительная мощность, снимаемая с термостатированной СБ, при параллельном включении регулятора; 2 – относительная мощность, снимаемая с термостатированной СБ, при экстремальном регулировании; 3 – относительная мощность, снимаемая с откидных панелей, при параллельном включении регулятора; 4 – относительная мощность, снимаемая с откидных панелей, при экстремальном регулировании

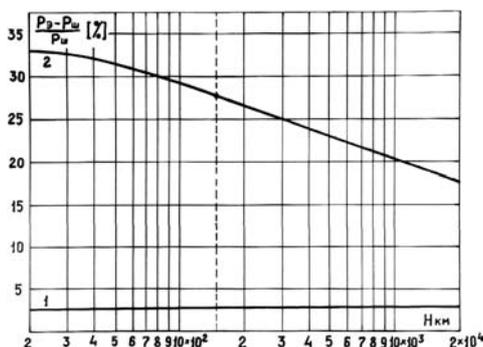


Рис. 10. Графики относительных выигрышей в мощности при различных способах регулирования в зависимости от высоты орбиты: 1 – относительный выигрыш в мощности, снимаемой с термостатированной СБ, экстремального регулирования по сравнению с параллельным включением регулятора; 2 – относительный выигрыш в мощности, снимаемой с откидных неориентированных панелей, экстремального регулирования по сравнению с параллельным включением регулятора

В. А. Бартнев, Ш. Ш. Кавтарашвили, В. А. Юксеев

ВЫБОР ПЕРИОДА ОБРАЩЕНИЯ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС

Анализируется выбор периода обращения спутников российской Глобальной навигационной спутниковой системы, исходя из соображений обеспечения непрерывного глобального и, как минимум, четырехкратного обзора поверхности земного шара с заданными точностными характеристиками. Рассматривается метод выбора драконического периода обращения всех спутников, позволяющий отказаться от коррекции орбитальных параметров на всем сроке их активного существования. В результате анализа эволюции орбитальных параметров спутников системы показана правильность выбора орбитальной структуры, обеспечивающая ее устойчивость на всем сроке активного существования.

Выбор орбитальных параметров спутников российской Глобальной навигационной системы (ГЛОНАСС) II поколения, в первую очередь их периода обращения, представлял собой сложную многокритериальную проблему оптимизации. Система ГЛОНАСС выполняет те же задачи, что и спроектированная десятилетием ранее американская Глобальная система местоопределения GPS, но проектирование, разработка и построение системы ГЛОНАСС выполнялись при иных условиях.

Во-первых, необходимо было обеспечить точность навигационных определений потребителей с помощью минимально-возможного фрагмента системы с четырьмя спутниками. Этот фрагмент сохранялся и в дальнейшем как часть орбитальной структуры при ее последующем наращивании до полного состава из 24 спутников.

Во-вторых, возможно по удовлетворению точности эфемеридного и временного обеспечения и, как следствие, точности навигационных определений потребителей ограничивались расположением наземного комплекса управления на территории бывшего Советского Союза с долготами командно-измерительных пунктов от 25° в. д. до 135° в. д. и их широтным разбросом в диапазоне всего лишь 15° : от 45° с. ш. до 60° с. ш.

В-третьих, выбранная для запуска ракета-носитель «Протон» могла выводить на орбиту сразу 3 спутника ГЛОНАСС, но это ограничивало как массу каждого спутника, так и высоту полета спутников, т. е. период их обращения.

В-четвертых, точность параметров разложения гравитационного потенциала Земли по сферическим функциям в системе параметров ПЗ-77, особенно резонанс-

ных гармоник с индексами 32 и 44 для полусуточного звездного и близких к ним периодов обращения, была не достаточна для обеспечения точности определения параметров движения спутников с заявленной точностью.

Проведенные исследования различных орбитальных структур учитывали следующие факторы:

- динамическую устойчивость орбитальных структур при воздействии различных возмущений с анализом кратности покрытия поверхности земного шара;
- влияние резонансных гармоник на устойчивость орбитальной структуры;
- влияние гравитационных возмущений Луны и Солнца;
- ограничения, накладываемые расположением полигона запуска и азимутом стрельбы;
- погрешности выведения спутников на целевую орбиту разгонным блоком;
- условия видимости наземных измерительных средств наземного комплекса управления (НКУ);
- требуемую точность эфемеридного и временного обеспечения.

В результате проведенного анализа и последующего синтеза была обоснована орбитальная структура, реализованная в настоящее время (рис. 1) [1]. Номинальное значение абсолютной долготы восходящего узла I идеальной орбитальной плоскости фиксируется на определенную эпоху. Абсолютные долготы восходящих узлов II и III плоскости соответственно на 120° и 240° больше.

Номинальное расстояние между соседними спутниками в плоскости по аргументу широты составляет 45° . Спутники каждой плоскости сдвинуты (сфазированы)

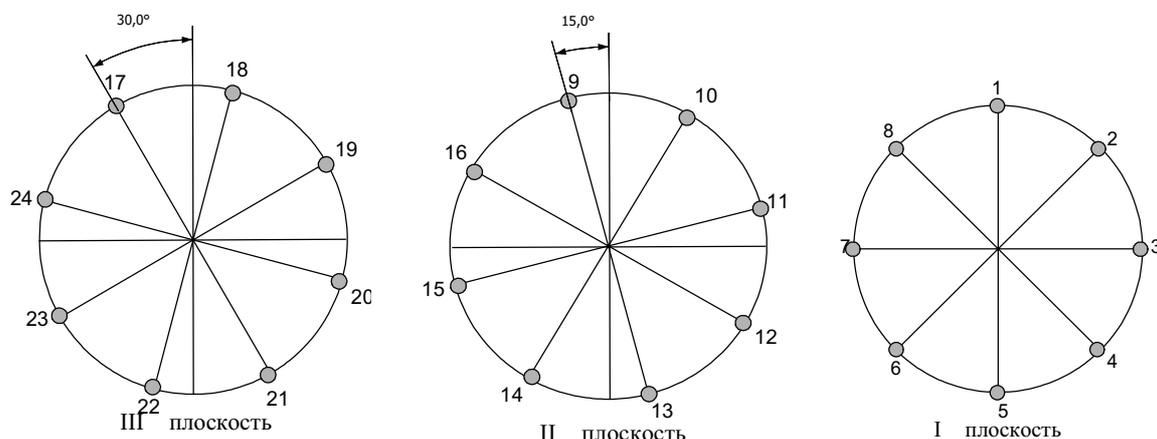


Рис. 1. Орбитальная структура системы ГЛОНАСС

относительно других спутников соседних плоскостей на 15° (см. рис. 1). Когда 1-й спутник I плоскости находится на экваторе, 9-й спутник II плоскости – на 15° выше плоскости экватора, а 17-й спутник III плоскости – на 30° выше плоскости экватора.

Номинальные значения параметров орбит приведены ниже:

Большая полуось	25 500 км
Эксцентриситет	0
Наклонение	$64,8^\circ$
Абсолютная долгота восходящего узла I орбитальной плоскости (относится к эпохе 0 ч 00 мин 00 с с 1 января 1983 г.)	$251^\circ 15'00''$

Выбор драконического периода обращения спутников и, соответственно, большой полуоси орбиты проведен с помощью моделирования движения спутников на околосинхронных орбитах с периодами, равными и меньшими половине звездных суток (11 ч 57 мин 58 с), с учетом влияния резонансных гармоник разложения гравитационного потенциала Земли с индексами 32 и 44.

Под воздействием этих гармоник, в силу повторяемости через два витка трасс спутников, появляются возмущения в большой полуоси и драконическом периоде. Величина возмущений зависит от гринвичской долготы восходящего узла L_3 , и она тем больше, чем ближе к стабильному резонансному периоду (половине звездных суток) находится драконический период обращения спутника (рис. 2).

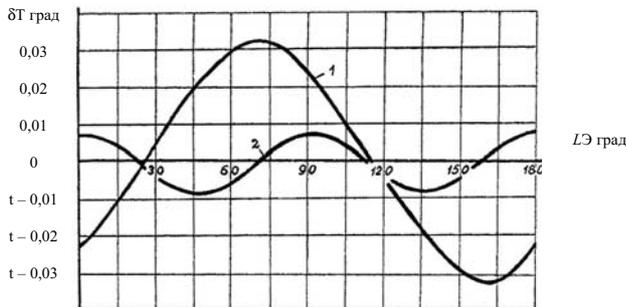


Рис. 2. Приращения драконического периода за виток в зависимости от гринвичской долготы восходящего узла для наклонения, близкого к выбранному (63°): 1 – от гармоники 32; 2 – от гармоники 44

Синусоидальный характер приращений драконического периода обращения для рассматриваемых гармоник вызывает либрацию гринвичской долготы восходящего узла. Суть либрации состоит в одновременных долгопериодических колебаниях долготы восходящего узла и драконического периода обращения относительно устойчивых точек по долготе. Приведем фазовые траектории либрации изображающей точки в плоскости переменных «гринвичская долгота восходящего узла – драконический период» под воздействием гармоники 32 (рис. 3). Траектория движения изображающей точки показана лишь для периодов меньше стабильного, резонансного периода. Полная картина может быть получена по условию симметрии фазовых траекторий относительно осей, проходящих через долготы устойчивого равнове-

сия $L^1_{\text{э.уст}}, L^2_{\text{э.уст}}$, равные для гармоники 32 при рассматриваемом наклонении $\sim 27^\circ$ и $\sim 207^\circ$ соответственно.

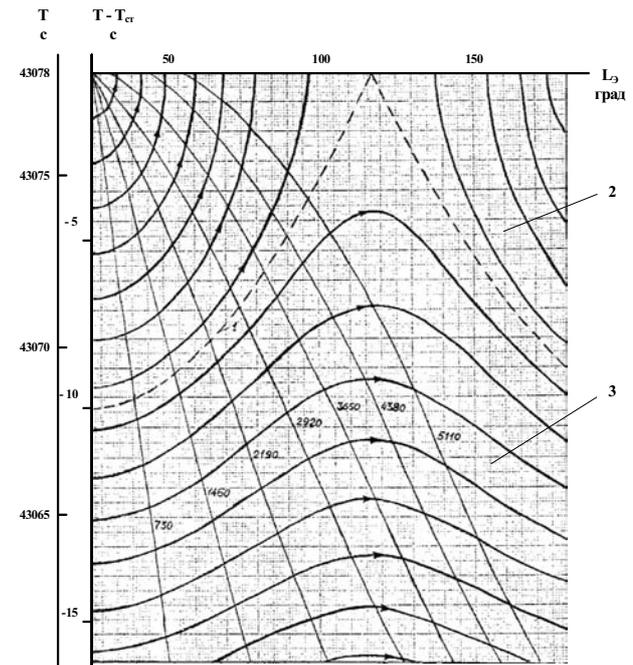


Рис. 3. Траектории либрации и дрейфа под действием гармоники с индексом 32:

1 – сепаратриса (граница области либрации и ротации); 2 – область либрации; 3 – область ротации

Штриховая линия на рис. 3 обозначает границу области либрации и области ротации – так называемую сепаратрису. Внутри области либрации фазовые траектории замкнуты, вне области либрации, т. е. в области ротации, разомкнуты, и спутник дрейфует по долготе в одном направлении. Направление либрации и дрейфа показаны стрелками на соответствующих фазовых траекториях. Тонкие линии на рис. 3 – это линии равных времен движения от устойчивых долгот в витках, проставленных на этих линиях.

Картина либрации и дрейфа от воздействия гармоники 44 аналогична гармонике 32, но амплитуда области либрации примерно в 4 раза меньше и имеется четыре значения долготы устойчивого равновесия (вместо двух для гармоники 32).

Полный период либрации для гармоники с индексом 32 равен $\sim 14,4$ года, а для гармоники с индексом 44 – около 20 лет. Совместное влияние резонансных гармоник несколько искажает картину фазовых траекторий, однако, тем не менее, определяющим является влияние гармоники 32.

Положим, что в данной орбитальной плоскости имеются два соседних по аргументу широты спутника, находящихся в области либрации с одним и тем же резонансным периодом. Если один спутник находится на устойчивой для гармоники 32 долготе $L^1_{\text{э.уст}} = \sim 27^\circ$, то второй спутник будет иметь долготу $\sim 49,5^\circ$. И под действием гармоники 32 через четверть периода либрации, т. е. примерно через 3,6 года, долготы обоих спутников совпадут и они будут иметь один и тот же аргумент широты. Это означает, что с точки зрения навигационных определенных два спутника превратятся в один.

Покажем качественную картину указанных уходов (рис. 4), где приведем значения долгот узлов L_j ($j = 1, 2, \dots, 8$) для восьми спутников, выведенных в одну плоскость со сдвигом по аргументу широты на 45° и начальным стабильным периодом в зависимости от времени полета спутников.

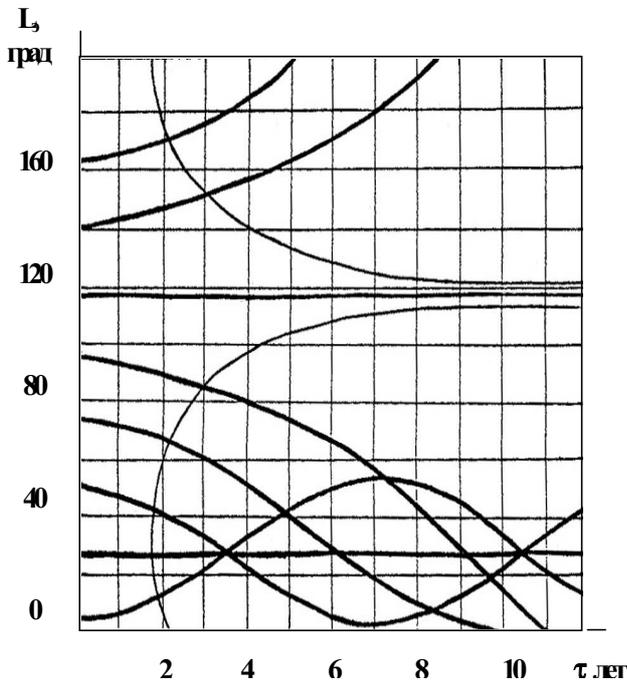


Рис. 4. Изменение гринвичских долгот восходящих узлов орбит восьми спутников от времени их полета под действием гармоника 32

Исходя из всех приведенных выше соображений был выбран средний драконический период обращения всех спутников системы примерно на 45 мин меньше стабильного, равный 11 ч 15 мин 44 с. Этот период обеспечивает интервал повторяемости трасс движения спутников и зон радиовидимости спутников средствами НКУ, составляющий 17 витков, который установлен в качестве мерного интервала для набора измерений текущих навигационных параметров и уточнения параметров движения центра масс спутников. Большая полуось орбиты спутников (25 500) отвечает этому среднему драконическому периоду обращения.

Выбор конкретных параметров движения каждого спутника, в первую очередь его драконического периода обращения, осуществляется путем целенаправленного выбора начальных условий движения в зависимости от его расположения в одной из трех орбитальных плоскостей орбитальной структуры. При этом принимаются одинаковые номинальные значения наклона ($64,8^\circ$) и эксцентриситета орбит (0). Абсолютная долгота восходящего узла спутников I орбитальной плоскости фиксируется на определенную дату ($251^\circ 15'00''$), абсолютные долготы спутников II и III плоскости равномерно (через 120°) расположены в плоскости экватора.

Устранение вековых уходов спутников вызовет дополнительные энергетические затраты на проведение необходимой коррекции периода обращения, увеличит нагрузку вычислительных и управляющих средств НКУ и

потребуется вывода спутника из системы на время проведения коррекции и дальнейшего набора измерительной информации на установленном интервале (7...8 сут).

В системе ГЛОНАСС предложен способ поддержания периода обращения, а значит, и относительного расположения спутников в системе без необходимости проведения коррекции на всем сроке активного существования. Это достигнуто за счет того, что для всех спутников системы выбирается одна фазовая траектория движения в области ротации, отвечающая одному среднему драконическому периоду обращения. А конкретное начальное значение драконического периода каждого спутника системы выбирается в зависимости от конкретного значения начальной гринвичской долготы данного спутника (его начального расположения в орбитальной структуре). Начальное значение периода выбирается по условию априорного совпадения драконического периода, осредненного для каждого спутника по высокочастотным составляющим разложения гравитационного потенциала Земли и главной резонансной гармоники 32, со средним периодом 11 ч 15 мин 44 с.

Как показали исследования, выбор таких значений начальных периодов позволяет обеспечить уход соседних спутников по аргументу широты в каждой орбитальной плоскости на величину, не превышающую заданную на всем сроке активного существования. Это подтверждается многолетними наблюдениями и исследованиями параметров движения спутников системы ГЛОНАСС на сроках их активного существования и анализом взаимного положения спутников в каждой плоскости в зависимости от времени наблюдения.

Приведем результаты расчетов отклонений (уходов) положения спутников ГЛОНАСС в аргументе широты от отвечающих им спутников так называемой идеальной орбитальной структуры (под идеальной орбитальной структурой понимается структура с номинальными параметрами, приведенными ранее, и с расположением 1-го спутника I орбитальной плоскости в плоскости экватора на опорную эпоху).

При прогнозировании положения спутников идеальной орбитальной структуры на любую эпоху учитывается только гравитационное притяжение Земли как эллипсоида вращения, определяемое гравитационной постоянной Земли μ и гармоникой с индексом 20.

Принята следующая методика расчета уходов реальных спутников от идеальной структуры:

- по реальным начальным условиям спутников осуществляется прогнозирование движения данного спутника на заданный интервал времени. Далее осуществляется расчет и запоминание времени выхода спутника на восходящий узел орбиты на всех витках заданного интервала времени;

- соответствующие моменты времени выхода реального спутника на восходящий узел проводится расчет аргумента широты dU спутника идеальной орбитальной структуры с системным номером (СН), соответствующим реальному спутнику;

- проводится расчет ухода реального спутника относительно идеального на данном витке по формуле

$$dU_{wk} = U_{wp} - U_{сн.ид}$$

а поскольку $U_p = 0$ (выход спутника на восходящий узел), то выражение преобразуется таким образом:

$$dU_{wk} = -U_{сн.ид}$$

Ниже приводится оценка уходов по аргументу широты в градусах на интервале 3,5 года (срок активного существования для этого типа спутников равен 3 годам) от даты запуска для спутников, запущенных в период с 1985 по 1997 гг. (рис. 5). Спутники 201, 203, 234 движутся в I плоскости, спутники 209, 210, 227, 229 – в III плоскости.

Оценка уходов спутников I плоскости (795 и 711) и спутника в III плоскости (793) на интервалах до 3,5 лет (спутник 795) и до 5 лет (спутники 793 и 711) приведена на рис. 6. Последние оценки для спутника 711 с 5-летним сроком активного существования относятся к концу 2004 г.

Таким образом, правильность методики выбора драконического периода обращения спутников системы ГЛОНАСС подтверждена на практике. За все время активного существования ни один из спутников не вышел за требуемые пределы удержания по аргументу широты,

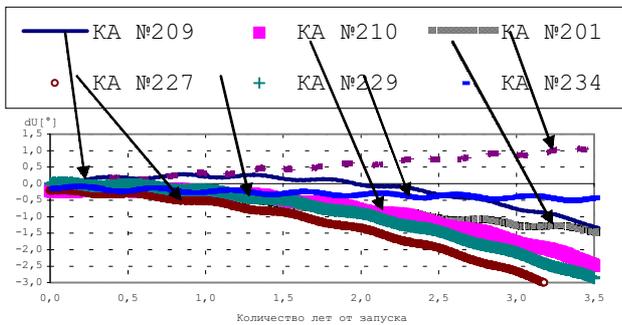


Рис. 5. Оценка уходов по аргументу широты для спутников 201, 203, 209, 210, 227, 229, 234

равные $\pm 5^\circ$, что позволило отказаться от каких-либо коррекций орбитальных параметров.

Орбитальные параметры спутников ГЛОНАСС следующего поколения с 7- и 10-летним сроком активного существования, в первую очередь драконические периоды их обращения, будут выбираться подобным же образом. Отличие будет заключаться только в более высоких требованиях по устойчивости орбитальной структуры, что скажется на необходимости более точного выбора начальных значений драконических периодов и более точной реализации орбитальных параметров при выведении спутников и их установке в выбранные системные точки.

Библиографический список

1. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС: интерфейс. контрол. документ / Координац. науч.-информ. центр. М., 2002.

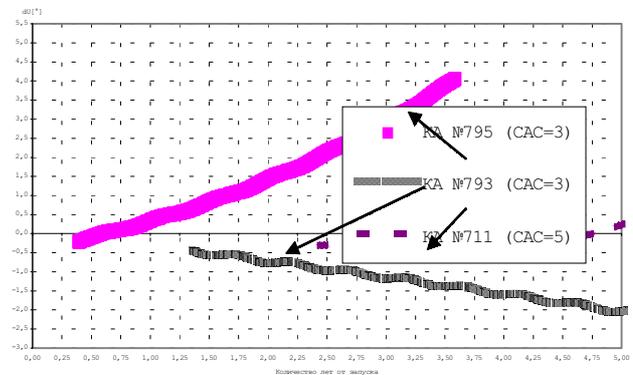


Рис. 6. Оценка уходов по аргументу широты для спутников 711,793, 782

V. A. Bartenev, Sh. Sh. Kavtarashwili, V. A. Jukseev

CHOICE OF THE PERIOD OF REVOLUTION OF SATELLITES GLONASS

Is analyzed the choice of the period of revolution of the satellites of Russian Global navigation satellite system on ideas of support continuous global and, as a minimum, of the fourfold overview on of the surface of globe with given precision characteristics/ Is considered the method of the choice of the draconic period of revolution of all satellites allowing to abandon correction of orbital parameters on all term of their active existence. As a result the analesis of the evolution of the orbital parameters of the satellites of system is show the correctness of the choice of orbital structure providing its stability on all term of active existence.

В. Г. Бондаренко

ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ, ЛЕТНОЙ ГОДНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ САМОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Обсуждаются вопросы методологии обеспечения безопасности полетов, связанные как с разобщенностью систем сертификации разработчиков и эксплуатантов авиационной техники, так и с приходом к стратегии эксплуатации по фактическому техническому состоянию.

Под безопасностью полетов понимается свойство авиационной транспортной системы осуществлять полеты без угрозы для жизни и здоровья людей. Безопасность полетов – понятие широкое, ее обеспечение зависит от деятельности всех звеньев авиационной транспортной системы.

Летная годность является характеристикой самолета и определяется реализованными в его конструкции принципами, конструктивными и технологическими решениями, позволяющими совершать безопасные полеты в ожидаемых условиях и при установленных методах эксплуатации [1]. Летная годность предъявляет к самолетам широкий спектр требований, определяющих возможность совершать безопасные полеты. Одним из них и, безусловно, важнейшим является надежность.

Надежность, в свою очередь, является сложным свойством, характеризующим безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Далее нам в большей степени придется обращаться к первым двум свойствам. Коротко определим их. Безотказность – это свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение заданного времени или заданной наработки. Долговечность – свойство объекта сохранять безотказность в течение заданного времени и заданной наработки.

Под сохранением летной годности понимается комплекс мероприятий, гарантирующих, что в любой момент срока службы самолет соответствует действующим требованиям летной годности и его состояние обеспечивает безопасную эксплуатацию [2].

В обеспечении безопасности полетов важная роль принадлежит вопросам системного, терминологического и понятийного порядка. Неоднозначность в толковании терминов и определений часто затрудняет выполнение анализа надежности, безопасности полетов и разработку мероприятий по их обеспечению.

В гражданской авиации России в последние годы сложились две системы сертификации:

– Система сертификации авиационной техники и объектов гражданской авиации (ССАТиОГА) во главе с Межгосударственным авиационным комитетом (МАК);

– Система сертификации объектов воздушного транспорта во главе с ГС гражданской авиации министерства транспорта РФ.

Первая система, в соответствии с законом Российской Федерации «О сертификации продукции и услуг», зарегистрирована в Государственном реестре [2]. Она является системой сертификации разработчика и изготовителя авиационной техники. В соответствии с ней обязательной сертификации подлежат следующие объекты

гражданской авиации: воздушные суда, авиационные двигатели, воздушные винты, комплектующие изделия, международные и категорируемые аэродромы, оборудование аэродромов, разработчики авиационной техники, производство авиационной техники.

Вторая система является системой эксплуатанта. Она также обязательна и зарегистрирована Госстандартом России 28.08.95 в Реестре за номером Росс.RV.001.АТ.01 как система сертификации на воздушном транспорте (ССВТ).

Разобщенность систем ССАТиОГА и ССВТ, отсутствие единой методологии их создания привело к тому, что в них не нашел системного решения комплекс задач обеспечения и поддержания летной годности самолетов.

На реализацию подходов к обеспечению надежности и летной годности оказывает влияние запоздалое введение в Советском Союзе норм летной годности самолетов (НЛГС). Впервые вопросы летной годности рассматривались в 1919 г. на Парижской конвенции. В соответствии со ст. 14 этой конвенции между государствами-участниками (11 стран) действовало соглашение о взаимном признании норм летной годности. В Приложении В к Парижской конвенции 1922 г. были впервые установлены международные нормы летной годности.

В отечественной практике нормы летной годности гражданских самолетов впервые приняты в 1967 г. Затем следовали их изменения и дополнения в 1972, 1974 гг. и окончательно они сформированы для самолетов в 1984 г., для вертолетов – в 1987 г. В настоящее время вместо норм летной годности приняты авиационные правила АП-25 для самолетов и АП-29 для вертолетов.

Эксплуатирующиеся и стареющие без замены самолеты Ту-154М и Б, Ту-134, Ил-62, Ил-76Т и ТД, Ан-24, Ан-26, Ан-32, Ан-12, Як-40 создавались не по нормам летной годности, а по отраслевым и внутрифирменным нормам. Каждая фирма часто по-своему понимала вопросы обеспечения устойчивости, управляемости, надежности и других характеристик самолетов. Достаточно рассмотреть архитектуру функциональных систем, чтобы убедиться в этом различии, например, при обеспечении надежности. Так, гидравлическая система Ту-154М и Б имеет трехкратное резервирование, а Ил-76Т и ТД – двукратное. И это, как правило, у одних и тех же заводо-поставщиков агрегатов и комплектующих изделий.

Самолеты Ил-86, Як-422 и Ан-28 создавались с использованием НЛГС-2, а Ту-204, Ил-96-300, Ан-74 и Ил-114 – НЛГС-3.

Система сертификации ССАТиОГА опирается на нормы летной годности, в которых степень опасности отка-

зов авиационной техники определена опасностью ситуаций, приводящих к отказам. В качестве таких ситуаций приняты усложненные условия полета (УУП), сложная ситуация (СС), аварийная ситуация (АС) и катастрофическая ситуация (КС).

Усложненные условия полета определены в нормах как ситуация, характеризующаяся незначительным увеличением психологической нагрузки на экипаж, незначительным ухудшением устойчивости управляемости и летных характеристик самолета. Эта ситуация отнесена к категории повторяющихся с вероятностью не более 10^{-3} на 1 ч полета.

Сложная ситуация характеризуется в НЛГС заметным повышением психологической нагрузки на экипаж, значительным ухудшением летных характеристик, устойчивости и управляемости самолета, а также выходом одного либо нескольких параметров полета за эксплуатационные ограничения, но без достижения предельных ограничений и расчетных условий. Предотвращение перехода сложной ситуации в аварийную должно быть обеспечено действиями экипажа в соответствии с Руководством по летной эксплуатации (РЛЭ). СС отнесена в НЛГС к категории умеренно повторяющихся с вероятностью 10^{-4} на 1 ч полета.

К эксплуатационным относятся ограничения, выход за которые недопустим в нормальной эксплуатации. Предельные ограничения и расчетные условия – ограничения, выход за которые недопустим ни при каких обстоятельствах, например достижение предельного ограничения по перегрузке чревато разрушением самолета.

Аварийная ситуация характеризуется значительными психологическими нагрузками на экипаж и приводит к достижению предельных ограничений и расчетных условий. Предотвращение перехода аварийной ситуации в катастрофическую, в соответствии с НЛГС, требует высокого профессионального мастерства членов экипажа. Аварийная ситуация, вызванная отказами авиационной техники, отнесена к событиям крайне маловероятным с вероятностью не более 10^{-6} на 1 ч полета. Следует иметь в виду, что авария сопряжена с потерей (списанием) самолета, но без человеческих жертв.

Катастрофическая ситуация определена как ситуация, при достижении которой предотвращение гибели людей невозможно, либо как ситуация с непредопределенным исходом полета. Эта ситуация признана практически невероятной с вероятностью появления не более 10^{-7} на 1 ч полета.

Подробный перечень особых ситуаций в данной статье обусловлен тем, что оценки надежности самолета и его систем, допустимых вероятностей появления в полете тех либо иных отказов должны сопоставляться с этими ситуациями. Использование же этих определений в ряде случаев вызывает затруднения. Так, степень психологической нагрузки на экипаж, его мастерство, степень ухудшения устойчивости, управляемости и летных характеристик самолета не имеют инженерных (количественных) оценок. Количественные оценки перехода к сложной и аварийной ситуации замкнуты только на параметры полета. Но можно привести множество отказов авиационной техники, приводящих к авариям и катастрофам, при сохранении в нормальных пределах параметров полета, устойчивости, управляемости и летных характеристик самолета. К ним относятся нелокализуемые пожары, разгерметизация салонов на эшелоне полета, интенсивное

попадание масла в систему наддува салонов, невыпуск хотя бы одной опоры шасси, отказ системы навигации и связи в сложных метеоусловиях и т. п.

Скорее всего, по этим причинам особым ситуациям в системе ССВТ присваивают свои категории: инцидент, серьезный инцидент и авиационное происшествие (АП).

Инцидент определен как событие, связанное с использованием самолета с момента вступления на борт человека, имеющего намерение совершить полет, и обусловленное отклонениями от нормального функционирования самолета, экипажа, служб управления и обеспечения полетов, воздействия внешней среды, могущее оказать влияние на безопасность полета, но не закончившееся АП.

Инцидент, создавший реальную угрозу безопасности полетов и не закончившийся АП благодаря мастерству экипажа, либо благоприятному стечению обстоятельств, называется серьезным инцидентом.

В разряд инцидентов попадают усложненные условия полета и сложная ситуация. Иногда вместо инцидента и серьезного инцидента в системе Эксплуатанта применяется понятие «предпосылки к авиационному происшествию» (ПАП).

Под АП понимается авиапроисшествие без человеческих жертв и авиапроисшествие с человеческими жертвами. Часто их, как и в системе разработчика, именуют авариями и катастрофами.

В Правилах расследования авиационных происшествий и инцидентов [3] в определение серьезного инцидента дополнительно внесено понятие выхода параметров полета «за пределы ожидаемых условий эксплуатации». В НЛГС сложная ситуация связывается с «достижением параметрами полета эксплуатационных ограничений». Возникает вопрос: как соотносятся ожидаемые условия эксплуатации с эксплуатационными ограничениями? В НЛГС ожидаемые условия эксплуатации характеризуются большим числом параметров, отнесенным к трем группам: параметры внешней среды, полета и эксплуатационные.

В обоих определениях количественных оценок наступления соответствующих ситуаций нет. С позиций надежности авиационной техники к состояниям инцидента и ПАП правомерно отнести любой отказ, не приведший к АП (аварии и катастрофе). Инцидент становится слишком широким понятием, включающим отказы с существенно различным по тяжести последствий влиянием на безопасность полетов. Очевидно, что в связи с этим, вводя градацию внутри особых ситуаций, определяемых как инцидент, в системе ССВТ применяют такое понятие, как инцидент, приведший и не приведший к изменению плана полета, т. е. была ли посадка вынужденной или нет.

Следует также иметь в виду, что разработчик классифицирует отказы по тяжести последствий на стадии проектирования и сопровождения эксплуатации, а эксплуатант – в процессе использования самолета по назначению. Но в системе ССВТ градация тяжести последствий отказа авиационной техники выражена несколько четче:

- если отказ не привел к изменению плана полета, но влиял на безопасность полета, то это инцидент;
- если отказ потребовал изменения плана полета (привел к вынужденной посадке), то это серьезный инцидент либо ПАП;

– если последствием отказа явилось разрушение самолета (тем более с человеческими жертвами), то это авиационное происшествие.

Но и здесь в определении инцидента присутствует неясное высказывание: «но влиял на безопасность полета». Нет четких критериев по выявлению этого влияния. Используются экспертные оценки, а они всегда субъективны.

Отсутствие взаимосвязанного подхода в системах ССАТиОГА и ССВТ к определениям и понятиям в области влияния отказов авиационной техники на безопасность полетов особенно остро сказывается при оценке надежности самолетов в процессе перехода к эксплуатации по техническому состоянию. В этом случае агрегаты и комплектующие изделия самолета распределяются на группы по методам эксплуатации. Пример такого распределения для самолета Ту-154М [4] приведен в таблице.

Метод эксплуатации до безопасного отказа определен 934-м агрегатам и комплектующим изделиям. Их техническое обслуживание осуществляется при условии контроля уровня надежности. Разработчиком установлен одинаковый для всех изделий уровень надежности, определенный значением k_{1000} , равным 0,2, т. е. допускается два отказа на 10 000 ч налета или один отказ на 5 000 ч. Поскольку таких изделий 934, нормативный налет на отказ по ним составляет 5,353 ч. В то же время при анализе влияния надежности авиационной техники на безопасность полетов по Красноярскому МТУ ВТ МТ РФ [5] отмечается, что в целом по всем типам самолетов налет на один инцидент составил 2 279 ч, а налет на один отказ – 22,8 ч. Для Ту-154М налет на один отказ в 2003 г. составил 33 ч, что в 6 раз больше установленного разработчиком [4]. Всего по парку самолетов на один инцидент приходилось 100 отказов авиационной техники.

Приведенную статистическую информацию эксплуатанта о надежности авиационной техники трудно интерпретировать в категориях разработчика, т. е. НЛГС. Так, при налете на инцидент, составляющий 2 279 ч, частота появления инцидентов равна $0,439 \cdot 10^{-3}$ на 1 ч полета. Если инцидент является УУП, то вероятность его появления из-за отказов авиационной техники по НЛГС будет составлять не более 10^{-3} на 1 ч полета, и в рассматриваемом регионе надежность авиатехники будет бо-

лее чем в два раза выше нормативной. Но если считать УУП сложной ситуацией с вероятностью появления не более 10^{-4} на 1 ч полета, то оценка надежности авиационной техники, согласно НЛГС, меняется на обратную, т. е. становится ниже нормативной более чем в два раза. Очевидно, что 100 отказов, приходящихся на один инцидент, необходимо идентифицировать подробнее, определив их либо как инцидент или серьезный инцидент, либо как УУП или СС.

В статистике ИКАО инциденты разделяют на инциденты, требующие изменения плана полета, и инциденты не требующие этого. В соответствии с ней число аварий и катастроф примерно одинаково: на одну катастрофу приходится 200..300 инцидентов, требующих, и 300..400 инцидентов не требующих изменения плана полета, в сумме 500..700 инцидентов. Если учесть, что по Красноярскому МТУ ВТ МТ РФ налет на один инцидент составил 2 278 ч, то, с учетом статистики ИКАО, вероятность возникновения катастрофической ситуации в среднем по всем типам самолетов может быть оценена как $(0,877...0,626) \cdot 10^{-6}$ на 1 ч полета, что не совсем удовлетворяет требованиям НЛГС по надежности авиационной техники. Она оказывается примерно на 30 % ниже, что может быть вполне объяснено различиями в трактовке понятия «инцидент» в системе ССВТ и ИКАО.

Поскольку разработчик Ту-154М нормирует налет на отказ в по рассматриваемому региону 6 раз меньше фактического, повышая вероятность возникновения катастрофических ситуаций до $(0,526...0,375) \cdot 10^{-5}$, что совсем не удовлетворяет требованиям НЛГС и действительному состоянию надежности самолетов, определяемому их бескатастрофной эксплуатацией.

Продолжим анализ имеющейся статистической информации в вероятностных представлениях. Рассматриваемое в методике значение $K_{1000} = 0,2$ является статистически средним значением числа отказов агрегата за 1 000 ч налета. Приведем его к 1 ч полета, найдем интенсивность отказов $\lambda_m = 0,2 \cdot 10^{-3}$, которую допустимо рассматривать как математическое ожидание числа отказов за 1 ч. По региональной статистике налет Ту-154М на один отказ составил 33 ч, что дает возможность определить $\lambda_\phi = 0,030$ 3. Воспользовавшись выражением для закона

Наименование системы	Количество изделий	Количество изделий по методу эксплуатации		
		По ресурсу	до предотказного состояния	до отказа
Пилотажно-навигационная	37	8	4	25
Радио-электронная	61	12	1	48
Силовая установка	16	6	1	9
Топливная	41	6	6	29
Планер	53	13	7	33
Шасси	53	12	10	31
Гидравлическая	86	2	5	79
Управления	48	8	2	38
Электрооборудование	468	8	3	457
Высотная	48	3	7	38
Противообледенительная	12	1	4	7
Кислородная	5	1	–	4
Бытового оборудования	110	–	3	107
Водоснабжения	29	3	1	25
Противопожарная	7	3	–	4
Итого	1074	86	54	934

распределения вероятностей Пуассона [6], перепишем его в удобном для анализа виде:

$$P(m) = \frac{(t \cdot n \cdot \lambda)^m}{m!} e^{-t \cdot n \cdot \lambda},$$

где t – отрезок времени, за который рассчитывается реализация вероятности отказов $P(m)$; n – число агрегатов в рассматриваемой совокупности; m – число одновременно отказавших агрегатов на отрезке t .

В наших исследованиях (см. таблицу) $n = 934$ для самолета Ту-154М в целом и $n = 79$ для гидросистемы самолета. Для t также приняты два значения; $t = 1$ ч, что соответствует НЛГС, и $t = 4$ ч как продолжительность некоторого беспосадочного полета.

По зависимости вероятности появления более одного отказа в течение 1 ч полета для агрегатов Ту-154М, эксплуатирующихся до безопасного отказа, при интенсивности отказа, определяемой по нормам методики и статистических данных Красноярского региона (рис. 1), следует два вывода:

- вероятность возникновения в течение 1 ч полета нескольких отказов присутствует и она весьма существенна;
- вероятность реализации отказов, нормируемая по [4], существенно превышает фактическую.

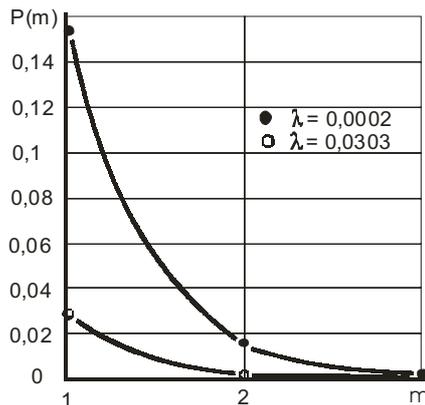


Рис. 1. Зависимость вероятности отказов от числа отказавших А и КИ для Ту-154М на 1 ч полета

Согласно зависимости вероятности реализации более одного отказа для агрегатов гидросистемы на отрезке времени 1...4 ч, вероятность отказа более одного агрегата гидросистемы самолета осталась ощутимой.

Чтобы в оценках вероятностей отказаться от таких понятий, как существенная, ощутимая вероятность, нами рассчитаны λ , n и t количества отказов m , реализующихся с вероятностью $P(m) = 10^{-4}$. Это пороговое по НЛГС значение вероятности, возникающее в полете сложной ситуации.

Приведем вначале значения числа отказов m , рассчитанные при $\lambda = 0,0002$ ($K_{1000} = 0,2$). Для самолета в целом ($n = 934$) число отказов равно:

- при 1 ч полета – 4;
- при 4 ч полета – 7.

Для гидросистемы самолета ($n = 79$) (рис. 2) число отказов равно:

- при 1 ч полета – 2;
- при 4 ч полета – 3.

По региональным статистическим материалам, при $\lambda = 0,0303$ для самолета в целом ($n = 934$) число отказов равно:

- при 1 ч полета – 3;
- при 4 ч полета – 4 (3,6).

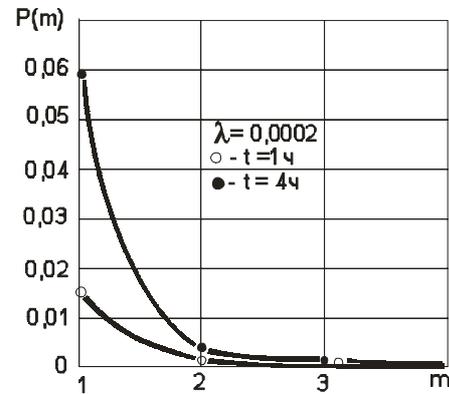


Рис. 2. Зависимость вероятности отказов от числа отказавших А и КИ гидросистемы

При $\lambda = 0,0002$, $n = 934$ и $t = 4$ ч с вероятностью $P(m) = 10^{-6}$ аварийная по НЛГС ситуация пороговая для реализации в полете, при выполнении 4-часового полета будет равна восьми отказам А и КИ.

Здесь рассматриваются отказы, не влияющие на безопасность полетов. Вместе с этим степень их безопасности никто не оценивал, тем более при реализации в одном полете далеко не одного, а семи и даже восьми отказов. По этому вопросу ведущий ученый в области безопасности полетов Б. В. Зубков высказался следующим образом [7]: «Во-первых, выявилась полная несостоятельность установления ресурсов, как средства предотвращения авиационных происшествий. При современном уровне промышленного производства интенсивность отказов изделий авиационной техники (так называемая лямбда-характеристика) все еще далека от вида дельта-функции и более близка к нормальному распределению. А это означает большие дисперсии сроков безотказной работы и появление отказов при самой различной нагрузке и бессмысленность введения ресурсных ограничений. По этой причине во всех случаях, когда отказы не связаны с тяжелыми последствиями, вводится эксплуатация до отказа, что позволяет использовать индивидуальные ресурсные возможности каждого изделия, но исключает возможность решения задачи предотвращения авиационных происшествий» [7].

В работе не ставилась задача найти ответы на все вопросы обеспечения надежности и безопасности полетов. В ней показана необходимость выполнения дополнительных исследований в области безопасности полетов при внедрении методов эксплуатации авиационной техники по фактическому состоянию и, в частности, эксплуатации до безопасного отказа.

Библиографический список

1. Авиационные правила. Нормы летной годности: АП-26 / МАК. М, 1996.

2. Гипич, С. Н. Современное состояние проблемы поддержания летной годности ВС / С. Н. Гипич // Инженерно-авиационный вестник. 1999. № 5(23). С. 4–15.

3. Правила расследования авиационных происшествий и инцидентов с гражданскими воздушными судами в РФ. Утв. 18.06.98 № 609. М., 1998.

4. Методика автоматизированного контроля, анализа и подготовки решений по управлению уровнем надежности А и КИ самолетов Ту-154, эксплуатируемых по техническому состоянию: утв. гл. конструктором А. С. Шенгардтом. М., 2001.

5. Анализ инженерно-авиационного обеспечения безопасности полетов в авиапредприятиях Красноярского МТУ ВТ МТ РФ. Красноярск, 2004. 28 с.

6. Венцель, Е. С. Теория вероятности / Е. С. Венцель. М.: Физматгиз, 1962. 563 с.

7. Зубков, Б. В. Методология расследования авиационных происшествий и инцидентов / Б. В. Зубков, А. В. Майоров // Научный вестник МГТУ ГА. 2004. № 75(9). С. 10–19.

V. G. Bondarenko

THE QUESTIONS OF METHODOLOGY PROVIDING RELIABILITY OF FLYING SUITABILITY AND SAFETY OF CIVIL AVIATION AIRPLANES

The questions of methodology providing reliability of flying are discussing in the work. These questions are connected with aviation technique developers and exploiters certification systems separation. They are also connected with transition to fact technical condition exploitation system.

В. Г. Бондаренко, Л. Г. Шаймарданов

ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА НАДЕЖНОСТИ И ЛЕТНОЙ ГОДНОСТИ САМОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ В АВИАКОМПАНИЯХ

Рассматриваются проблемные вопросы мониторинга надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации, связанные с процедурами получения и сопоставления оценок надежности с требованиями норм летной годности самолетов.

Процесс эксплуатации (использования по назначению) самолетов сопровождается изменениями характеристик надежности как планера, так и функциональных систем. Интенсивность этого изменения, а правильнее сказать – деградации, определяется большим числом факторов, многие из которых прямо связаны с авиакомпанией–эксплуатантом [1]. Здесь следует в первую очередь отметить климатическую зону базирования, протяженность маршрутов, их географическое расположение, уровень организации летной работы и многое другое.

Объективному процессу деградации самолета и его систем при использовании по назначению противостоит процесс технического обслуживания, направленный на восстановление надежности и поддержание летной годности самолетов. Техническое обслуживание, как и использование по назначению самолетов гражданской авиации, строго регламентировано нормативно-техническими документами. Несмотря на это, качество технического обслуживания существенно зависит от эксплуатанта: квалификации и дисциплинированности его инженерно-технического персонала, уровня организации работ, технической оснащенности цехов и лабораторий, своевременность поставок запасных агрегатов и материалов, условий труда при техническом обслуживании (наличие ангаров, доков) и т. п. В связи с этим в авиационных кругах все чаще поднимается вопрос о необходимости мониторинга надежности экземпляров самолетов в авиакомпаниях. Острота этого вопроса возрастает по мере внедрения в практику стратегий технической эксплуатации изделий авиационной техники по фактическому техническому состоянию взамен стратегии эксплуатации по наработке.

При стратегии эксплуатации по наработке периодичности, объемы работ на агрегатах самолета либо их замены выполняются вне зависимости от состояния по наработке определенного числа летных часов, посадок, циклов или месяцев службы. При стратегиях эксплуатации по состоянию объемы работ на агрегатах либо их замены определяются по результатам контроля их технического состояния или контроля уровня надежности.

Выполнение мониторинга надежности систем самолетов – на первый взгляд, задача не столько сложная, сколько трудоемкая. Непременным условием выполнения мониторинга является наличие в авиакомпании достаточного объема достоверной статистической информации об отказах, неисправностях и наработках агрегатов и комплектующих изделий самолетов. Такую информацию может иметь авиакомпания, эксплуатирующая 15 и более самолетов одного типа в течение пяти и более лет.

Процедура оценки надежности функциональных систем самолета включает следующие известные из теории надежности [2] операции:

- построение зависимости вероятностей $p_i(t)$ их безотказной работы от наработки t по известным статистическим данным об отказах и наработках агрегатов;
- построение эквивалентной схемы последовательных и параллельных соединений агрегатов с учетом влияния их отказов на работу системы по схеме функциональной системы;
- преобразование эквивалентной схемы в расчетную;
- выборка наработки t_i агрегатов функциональной системы рассматриваемого экземпляра самолета из статистических материалов авиакомпании;
- определение соответствующих значений вероятностей $p_i(t)$ безотказной работы из графиков $p_i(t)$ по известным наработкам t_i агрегатов и занесение их в расчетную схему;
- расчет вероятности P безотказной работы функциональной системы в соответствии со схемой последовательного и параллельного соединения агрегатов по значениям p_i .

Полученное значение вероятности безотказной работы P не является самоцелью. Оценка надежности самолета в целом и его функциональных систем должны выполняться в сравнении с нормативными значениями. Они определены в нормах летной годности самолетов (НЛГС) [3] в виде вероятности отказа за 1 ч полета, значение которой зависит от тяжести последствий отказа. Так, отказы, приводящие к катастрофической ситуации, допускаются с вероятностью на 1 ч полета не более 10^{-7} , аварийной ситуации – 10^{-6} , сложной ситуации – 10^{-4} .

Рассматриваемое значение вероятности P безотказной работы систем экземпляра самолета определено при различных значениях времени t_i наработки агрегатов и комплектующих изделий. В связи с этим естественен вопрос о возможности приведения этих вероятностей $p_i(t)$ к 1 ч наработки и затем расчета вероятности отказа системы на 1 ч работы для сопоставления с требованиями НЛГС. Нами на тестовых задачах выполнена проверка правомерности такого подхода.

Для схемы последовательного соединения n элементов (рис. 1), вероятность безотказной работы которых, определенная на интервале времени T , одинакова и равна P . Вероятность отказа $q = 1 - p$. В данном случае вероят-

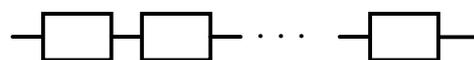


Рис. 1. Схема последовательного соединения элементов

ность безотказной работы P системы будет $P = p^n$ и, соответственно, вероятность $Q = 1 - p^n$. Тогда вероятность отказа системы в течение 1 ч составит

$$Q_1 = \frac{Q}{T} = \frac{1 - p^n}{T} = \frac{1 - (1 - q)^n}{T}.$$

Теперь определим вероятность Q'_1 отказа системы, приводя к 1 ч работы вероятности отказов элементов системы:

$$q'_1 = \frac{q}{T}, p'_1 = 1 - q'_1 = 1 - \frac{q}{T} \text{ и}$$

$$P'_1 = p_1^n = \left(1 - \frac{q}{T}\right)^n, \text{ откуда}$$

$$Q'_1 = 1 - \left(1 - \frac{q}{T}\right)^n.$$

Для сопоставления результатов найдем отношение вероятностей отказа системы:

$$\bar{Q}_1 = \frac{Q'_1}{Q_1} = \frac{1 - \left(1 - \frac{q}{T}\right)^n}{1 - (1 - q)^n} T.$$

Численный анализ этого выражения дал возможность установить независимость \bar{Q}_1 от T и ее возрастание по n (рис. 2).

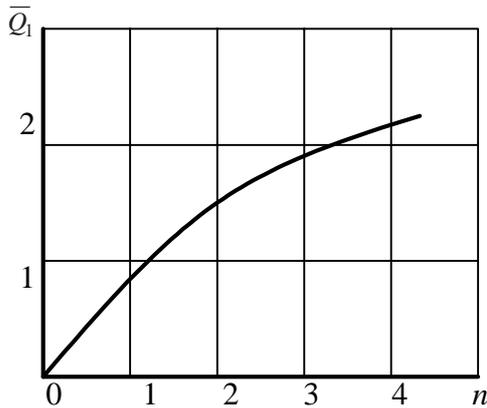


Рис. 2. Зависимость оценки вероятности безотказной работы системы с параллельным соединением от числа элементов при различных способах приведения решения к часу полета

Рассмотрим ту же задачу применительно к схеме параллельного соединения элементов в систему (рис. 3).

При первом способе

$$Q_1 = \frac{q^n}{T}.$$

При втором способе приведем решение к 1 ч полета:

$$q'_1 = \frac{q}{T} \text{ и } Q'_1 = \left(\frac{q}{T}\right)^n,$$

тогда

$$\bar{Q}_1 = \frac{1}{T^{n-1}}.$$

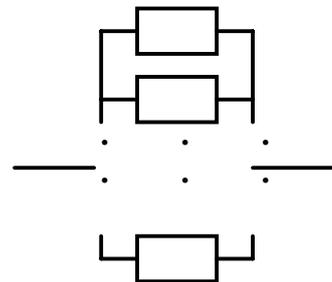


Рис. 3. Схема параллельного соединения элементов

Таким образом, при наработке агрегатов и комплектующих изделий функциональной системы, равной 5 000–10 000 ч, в трех-, четырехкратном резервировании агрегатов, свойственных системам самолета, ошибка в приведении вероятности отказа к часу полета, может увеличиваться на 5...9 порядков. В связи с этим результаты расчета надежности систем, выполненные по фактическим наработкам агрегатов экземпляра самолета, в настоящее время остаются без критериальных оценок.

Расчеты надежности систем самолетов с определением оценок надежности агрегатов и комплектующих изделий по статистическим материалам авиакомпании могут быть выполнены при задании одинаковой наработки всем агрегатам систем. В этом случае оценки вероятностей отказов могут быть приведены к 1 ч полета и сопоставлены с требованиями НЛГС. Но это будут усредненные оценки надежности систем парка самолетов авиакомпании, которые, безусловно, имеют самостоятельную ценность, но не являются мониторингом надежности экземпляра.

Библиографический список

1. Далецкий, С. В. Проблемы формирования системы технического обслуживания и ремонта воздушных судов гражданской авиации / С. В. Далецкий; МАИ. М., 2001. 135 с.
2. Воробьев, В. Г. Надежность и эффективность авиационного оборудования / В. Г. Воробьев, В. Д. Константинов. М.: Транспорт, 1995. 248 с.
3. Авиационные правила. Нормы летной годности: АП-26 / МАК. М., 1996.

V. G. Bondarenko, L. G. Shajmardanov

THE PROBLEMS OF MONITORING OF RELIABILITY AND FLYING SUITABILITY OF CIVIL AVIATION AIRPLANES

The questions of functional systems reliability monitoring of civil aviation airplanes are discussing in the work. These questions are connected with procedures of reliability estimation, receiving and comparing it with requirements of flying suitability of airplanes standards.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Предлагается расчет внешнего теплообмена космического аппарата, учитывающий солнечную и теньевую орбиты, с исследованием температурных полей космического аппарата и определением составляющих тепловых потоков, не связанных с температурными участками поверхности.

Для расчета падающего потока прямого солнечного излучения может быть использована простейшая однородная математическая модель, основанная на представлении солнечной радиации в виде пучка параллельных лучей. Расчетная формула для определения оставяющей Q_o записывается следующим образом:

$$Q_o = S_o F_m^s,$$

где F_m^s – площадь миделя по направлению солнечной радиации.

Задача определения величины солнечного теплового потока может быть решена аналитически, графически или численно. В случае невыпуклой геометрии КА расчет площадей миделя, от которого целиком зависит нахождение потока солнечного излучения, представляет собой весьма трудоемкую задачу. Построение математической модели для определения потоков от планеты сложнее, чем для прямой солнечной радиации, поскольку при околопланетных полетах нельзя пренебрегать угловыми размерами планеты. В общем случае элементарным потоком, поступающим от излучающей площадки dF_E на площадку dF , рассчитывается по выражению

$$d^2Q = IdF_E \cos \psi_E d\omega_E,$$

где I – интенсивность излучения; ψ_E – угол между нормалью N_E к излучающей площадке и направлением на центр площадки dF ; $d\omega_E$ – элементарный телесный угол, в котором видна площадка dF из центра dF_E .

С учетом выражения для элементарного телесного угла

$$d\omega_E = \frac{1}{r^2} \cos \psi dF,$$

где r – расстояние между центрами площадок; ψ – угол между и направлением на центр площадки dF_E ,

$$d^2Q = I \frac{1}{r^2} \cos \psi \cos \psi_E dF dF_E.$$

Если ввести элементарный телесный угол, в пределах которого видна площадка dF_E из центра площадки dF ,

$$d\omega = \frac{1}{r^2} \cos \psi_E dF_E,$$

тогда

$$d^2Q = I \cos \psi d\omega dF.$$

При использовании диффузной модели, основанной на законе Ламберта, интенсивность излучения не зависит от направления и связана с интегральной плотностью полусферического излучения E_o следующим образом:

$$I = \frac{1}{\pi} E_o. \quad (1)$$

Тепловой поток Q получится как результат интегрирования выражения (1) в пределах телесного угла обзора планеты Ω , а также по поверхности участка KA :

$$Q = \int_F dF \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} E_o \frac{\cos \psi + |\cos \psi|}{2} d\omega.$$

В этой формуле учтена возможность самозатенения воспринимающей площадки, когда $\psi = \frac{\pi}{2}$, однако не принимаются во внимание затенения от других участков поверхности КА. Альbedo планеты считается постоянным и равным своему среднему значению. Плотность отраженного планетой солнечного излучения полагается пропорциональной плотности падающей радиации:

$$E_o^{OTP} = A_{CP} S_o \frac{\cos \psi_{II} + |\cos \psi_{II}|}{2},$$

где ψ_{II} – угол между нормалью к отражающему элементу и направлением на Солнце.

Плотность собственного излучения Земли в общем виде записывается по выражению

$$E_o^{OTP} = \frac{1 - A_{CP}}{4} S_o.$$

Таким образом, тепловые потоки собственного Q_E и отраженного Q_R планетой солнечного излучения имеют вид

$$Q_E = \int_F dF \left[\frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \frac{\cos \psi_{II} + |\cos \psi_{II}|}{2} d\omega \right],$$

$$Q_R = \int_F dF A_{CP} S_o \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \frac{\cos \psi_{II} + |\cos \psi_{II}|}{2} \frac{\cos \psi + |\cos \psi|}{2} d\omega.$$

Внутренние интегралы являются чисто геометрическими характеристиками. Выражение

$$\phi_1 = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \frac{\cos \psi + |\cos \psi|}{2} d\omega$$

совпадает с локальным углом – коэффициентом для элемента поверхности КА. По аналогии вводится и комбинированный локальный угловой коэффициент

$$\phi_2 = \frac{1}{\pi} \int_{\omega} \frac{\cos \psi_{II} + |\cos \psi_{II}|}{2} \frac{\cos \psi + |\cos \psi|}{2} d\omega.$$

Таким образом, математические модели лучистых диффузионных потоков от планеты на незатененные участки КА могут быть представлены в виде

$$Q_E = \int_F c_1 \phi_1 dF, \quad (2)$$

$$Q_R = A_{CP} S_o \int_F \phi_2 dF. \quad (3)$$

Для углового коэффициента ϕ_1 существует аналитическое выражение, устанавливающее его зависимость от ориентации воспринимающей площадки dF и высоты КА от поверхности планеты [1; 2].

Аналитическая зависимость для ϕ_2 в общем случае отсутствует. Еще необходимо отметить, что диффузная модель описывает процесс отражения приближенно, так как при больших углах падения характер отражения бли-

же к зеркальному. В этом случае отраженное излучение можно считать пучком параллельных лучей и пользоваться при расчете Q_R однородной моделью, которая аналогична модели, принятой для потока прямого солнечного излучения:

$$Q_R^{3EPK} = A_{CP} S_{\Theta} F_M^R k, \quad (4)$$

где F_M^R – площадь мидела участка поверхности КА, вычисленного по направлению распространения зеркального отражения; k – коэффициент рассеяния однородного потока лучистой энергии при зеркальном отражении от сферической поверхности, который рассчитывается по формуле

$$k = \frac{b_0^2 \sin 2\beta}{2 \sin \gamma_S [2 \cos(2\beta - \gamma_S) - b_0 \cos \beta]},$$

где $b_0 = \frac{R}{R+H}$; здесь R – радиус Земли, H – высота над поверхностью Земли. Углы β и γ_S связаны уравнением

$$b_0 \sin \beta = \sin(2\beta - \gamma_S),$$

решать которое относительно β при известном значении γ_S можно лишь численно.

Исследование применимости диффузной и зеркальной моделей для определения потоков солнечной радиации, отраженной поверхностью планеты, показали, что областью эффективного использования зеркальной модели отражения является диапазон углов $\gamma_S = 60...70$. Таким образом, моделирование внешних источников тепла для КА, совершающего полет по околопланетной орбите, может быть выполнено на основе двух математических моделей: диффузной и однородной.

Поток прямого солнечного излучения Q_{Θ} дописывается с помощью однородной модели, поток собственного излучения планеты Q_E – диффузной, а для потока отраженного планетой солнечного излучения Q_R требуется построение комбинированной модели. Коэффициент поглощения поверхности элемента КА зависит от спектрального состава падающего излучения. Тогда поглощенный тепловой поток для плоского элемента незатененной поверхности может быть определен следующим образом:

$$Q_{\text{погл}} = A_{\Theta}(Q_{\Theta} + Q_R) + eQ_E,$$

где Q_{Θ} , Q_R , Q_E определяются по формулам (2), (3), (4). В результате имеем

$$Q_{\text{погл}} = A_{\Theta} \left(S_{\Theta} F_M^S + A_{CP} S_{\Theta} \int_F \Phi_2 dF \right) + \epsilon \int_F c_1 \Phi_1 dF.$$

Расчет внешнего теплообмена. Взаимные затенения различных элементов поверхности, которые следует учитывать при анализе теплообмена современных КА сложной формы, затрудняют проведение аналитических расчетов и приводят к необходимости создания новых методов решения задачи, основанных на использовании ЭВМ.

В настоящее время разрабатывается проекционный подход к решению задач теплообмена КА [62]. Указанный подход позволяет свести нахождение всех видов тепловых потоков, падающих на поверхность КА произвольной конфигурации, к определению совокупности характерных площадей проекции его участков, т. е. к решению чисто геометрических задач.

Вычислить величину потока прямого солнечного излучения можно численным методом расчета площадей

мидела участков поверхности КА с учетом взаимных затенений. Метод основан на моделировании падающего однородного потока с помощью однородного пучка параллельных лучей, исходящих из узлов равномерной прямоугольной сетки с шагом h , расположенной на плоскости (плоскость мидела) перпендикулярно распространению солнечных лучей:

$$F_M \approx n \cdot h^2,$$

где n – число точек, узлов; h – шаг сетки.

Этот метод может быть успешно применен для расчета потоков прямого излучения Солнца и потока отраженного планетой солнечного излучения в рамках зеркальной модели отражения. Численный расчет диффузных потоков лучистой энергии связан с необходимостью предварительных преобразований, приведенных выше.

Для осуществления учета возможных затенений различных частей конструкции КА (включая и самозатенение участков), вводят функцию затенения σ_z , которая определяется на множестве пар точек, одна из которых принадлежит видимой с КА части поверхности планеты, а другая – рассматриваемому участку аппарата:

$$\sigma_z = \begin{cases} 1 - \text{при наличии прямой} \\ \text{видимости между парой точек;} \\ 0 - \text{при затенении.} \end{cases}$$

Тогда, после изменения порядка интегрирования в (2), получим:

$$Q = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} E_O d\omega \int_F \sigma_z \cos \psi dF.$$

Внутренний интеграл представляет собой площадь мидела F_M^E участка F по направлению от элемента поверхности планеты с учетом затенений другими участками КА:

$$Q = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} E_O F_M^E d\omega.$$

Для потока собственного излучения планеты с учетом выражения (3)

$$Q_E = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} c_1 F_M^E d\omega.$$

Если разбить видимую часть поверхности планеты на зоны F_M^{Ei} ($i=1, 2, \dots, m$), которым соответствуют телесные углы ω , составляющие в сумме телесный угол обзора планеты Ω , то интеграл (2) заменится суммой интегралов:

$$Q_e = \frac{1}{\pi} \sum_{\Omega_i} \int c_1 F_M^{Ei} d\omega.$$

Допустим, что зоны разбиения выбраны настолько малыми, что при интегрировании в пределах каждый из них с достаточной степенью точности можно заменить величины Ψ_{Π} и F_M^E постоянными значениями, вычисленными для центров зон Ψ_{Π} и F_M^{Ei} . После вынесения постоянных за знак интеграла получим

$$Q_E \approx \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^m c_1 F_M^{Ei} \int_{\Omega} d\omega$$

или, выполнив интегрирование,

$$Q_E \approx \frac{1}{\pi} \sum c_1 \Omega_i F_M^{Ei}.$$

Аналогично может быть получена приближенная формула для нахождения диффузного потока отражен-

ного планетой солнечного излучения, падающего на участки КА произвольной конфигурации:

$$Q_R \approx A_{CP} S_O \frac{1}{\pi} \sum \frac{\cos \psi_{ni} + |\cos \psi_{ni}|}{2} \Omega_i F_M^{Ei}.$$

Таким образом, вычисление внешних тепловых потоков, падающих на поверхность КА, с учетом затенения в рамках диффузной модели удается свести к расчету набора площадей миделя участков его конструкции по совокупности направлений от центров зон, на которые разбивается поверхность планеты. Эта задача может быть решена с помощью изложенного выше метода определения площадей миделя. В результате исследования различных способов разделения поверхности планеты, а также решения задачи оптимизации разработана методика определения оптимальных параметров разбиения. Оптимизация проводится на основе среднеквадратической интегральной оценки локального углового коэффициента для элементарной площадки dF , имеющей переменную ориентацию относительно поверхности планеты:

$$S = \sqrt{\frac{1}{\vartheta_O + \frac{\pi}{2}} \int_0^{\vartheta_O + \frac{\pi}{2}} (\varphi_1 - \varphi_2)^2 d\varphi}.$$

Локальный угловой коэффициент φ_1 является известной функцией угла ψ между вертикальным направлением и нормалью N к площадке dF , величина которого изменяется от 0 до $(\vartheta_O + \frac{\pi}{2})$ ($u_O - 1/2$) плоского угла обзора планеты. Приближенное значение локального углового коэффициента φ_1 , при выбранном способе разбиения зависит не только от угла ψ , но и от азимутного угла α , задающего ориентацию нормали \bar{N} к площадке, а также от параметров разбиения: границ поясов $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \dots, \nu_{k+1}$ углов, характеризующих широтное расположение центров зон m_1, m_2, \dots, m_n , количество зон m_1, m_2, \dots, m в каждом поясе и относительных долготных сдвигов поясов l_1, l_2, \dots, l_k ($l_1 = l_2 = 0$), если их общее число $k > 2$. Величина φ_1 может быть вычислена по формуле

$$\varphi_1 = \frac{1}{\pi} \sum \sum \frac{\cos(\bar{N}_i \rho_{ij}) + |\cos(\bar{N}_i \rho_{ij})|}{2} \Omega_i,$$

где ρ_{ij} – единичный вектор, направленный из центра элементарной площадки в центр j -зоны i -пояса, координаты которого зависят от параметров разбиения; Ω_i – телесный угол в пределах которого видна зона, принадлежащая i -му поясу,

$$\Omega_i = \frac{4\pi}{m_i} \left(\sin^2 \frac{\vartheta_{i+1}}{2} - \sin^2 \frac{\vartheta_i}{2} \right).$$

Интегральная оценка зависит от тех же величин, что и φ_1 , за исключением ψ :

$$S = S(\alpha, \bar{P}).$$

Вектор \bar{P} объединяет все параметры, задававшиеся при членении поверхности на зоны. Азимутальный угол ориентации воспринимающей площадки α , величина которого также определяется интегральной оценкой S , является случайной величиной, распределение которой зависит от конкретной конфигурации поверхности участка КА и в общем случае неизвестно. Поэтому задача оптимизации формулируется следующим образом: требуется

выбрать вектор параметров разделения \bar{P} , минимизирующий оценку S в условиях неопределенного изменения значения α .

При использовании минимальной стратегии решение указанной задачи сводится к отысканию вектора P , обеспечивающего значение интегральной оценки

$$S_O = \min_P \max_\alpha S(\alpha, \bar{P}).$$

Внутренний теплообмен. При анализе теплообмена в отсеке КА в общем случае объектом является весь комплекс тепловых взаимосвязей оборудования, энергетических устройств и аппаратуры, устанавливаемый на борту, как между собой, так и с внутренней газовой средой, с его оболочкой и другими конструктивными элементами.

Среди процессов теплообмена, происходящих в отсеках КА, одинаково важны кондуктивный, конвективный и лучистый теплообмены. В общем случае следует отметить следующее. Если степень черноты внутренней поверхности корпуса и поверхности аппаратуры, размещаемой в отсеке, велика, то коэффициент теплоотдачи излучения может в некоторых случаях составлять $\alpha = 3 \dots 5$ Вт/м², что соизмеримо с коэффициентом конвективного теплообмена между циркулирующим газом и внутренними элементами отсека, а иногда и больше него [2].

Следует также отметить, что значительное влияние на теплообмен внутри герметичного отсека КА оказывает отсутствие естественной конвекции в условиях невесомости. В герметичном отсеке КА существует только вынужденная конвекция, т. е. перемещение газовой среды происходит под действием вентилятора. Величины тепловых потоков, выделяемых агрегатами и энергоустановками, находящимися в отсеках КА, определяются в каждом конкретном случае и зависят от их мощности, особенностей конструкции, типа, состава, расположения. Одним из основных потребителей энергии на борту непилотируемых КА являются радиоэлектронная аппаратура, которая в то же время представляет и один из главных источников внутренней тепловой энергии. При этом только 5...10% потребляемой аппаратурой мощности превращается в мощность полезных сигналов, остальная же энергия превращается, как правило, в тепло [1].

Оценку величины энергопоступлений от тепловыделяющего оборудования и приборов в стационарном режиме можно дать, располагая основными данными по мощности и времени работы агрегатов:

$$Q_{ПП} = k \sum_{i=1}^n N_i (1 - \eta_i),$$

где k – коэффициент одновременности работы приборов; N – мощность i -го прибора; η_i – КПД i -го прибора.

На практике чаще всего $(1 - \eta_i) \approx 1$, так как вся энергия приборов, установленных в отсеке, выделяется там же.

При оценке теплового режима гермоотсека КА под действием внешних источников тепла, а также для последующего определения суммарного количества тепла, поступающего в газовую среду, для расчета системы терморегулирования строят график энерговыделения приборов и оборудования. Этот график является циклограммой тепловыделения приборов за период вращения вокруг Земли.

Для i -го нелокализованного источника тепла, расположенного в гермоотсеке, дифференциальное уравнение

изменения среднеинтегральной температуры по времени имеет вид

$$(cm)_{npi} \frac{dT_{npi}}{dt} = Q_{npi} + (\alpha F)_{npi} (T_K - T_{npi}), \quad (5)$$

где c_{npi} и m_{npi} – удельная теплоемкость и масса i -го прибора; Q_{npi} – энерговыделение, определяемое программой полета; α_{npi} – коэффициент теплоотдачи от i -го прибора площадью F_{npi} к газу; T_K – температура газов в гермоотсеке:

$$T_{npi} = \frac{1}{V} \iiint T_{npi}(x, y, z) dx dy dz.$$

Суммарное количество тепла, поступающее в гермоотсек КА от n источников, вычисляются по выражению

$$Q_{np} = \sum (\alpha F)_{npi} (T_{npi} - T_K)$$

Заменяя в уравнении (5) производную ее разностным аналогом и вводя произвольный вещественный параметр (вес слоя), получают однопараметрическое семейство схем [3]:

$$(cm)_{npi} \frac{T_{npi}^{j+1} - T_{npi}^j}{h_\tau} = \frac{1}{2} (Q_{npi}^{j+1} + Q_{npi}^j) + (\alpha F)_{npi} [\sigma (T_K^{j+1} - T_{npi}^{j+1}) + (1 - \sigma) (T_K^j - T_{npi}^j)]. \quad (6)$$

Если известны все составляющие тепловых потоков, поступающих в отсек КА, то можно определить изменение температуры газа во времени.

Применяя для отсека модель идеального смешения, можно записать дифференциальное уравнение изменения температуры:

$$(c_p p)_G V_O \frac{dT_K}{dt} = \sum (\alpha F)_{CTi} (T_{CTi} - T_K) + \sum (\alpha F)_{npi} (T_{npi} - T_K) + (c_p m)_G (T_{BX} - T_K)$$

где V_O – объем отсека; α_{CTi} , F_{CTi} , T_{CTi} – коэффициент теплоотдачи, площадь и температура стенок отсека; α_{npi} , F_{npi} ,

T_{npi} – коэффициент теплоотдачи, площадь и температура приборов; c_{pe} , m_e , T_{ex} – удельная теплоемкость, расход и температура подаваемого газа.

Проведя преобразование, получим однопараметрическое семейство разностных схем [3]:

$$c_p p V_O \frac{T_K^{j+1} - T_K^j}{h\tau} = \sum (\alpha F)_{CTi}^j [(T_{CTi}^{j+1} - T_K^{j+1}) + (1 - \sigma) (T_{CTi}^j - T_K^j)] + \sum (\alpha F)_{npi} [\sigma (T_{npi}^{j+1} - T_K^{j+1}) + (1 - \sigma) (T_{npi}^j - T_K^j)] + (c_p m)_G^j [\sigma (T_{BX}^{j+1} - T_K^{j+1}) + (1 - \sigma) (T_{BX}^j - T_K^j)]. \quad (7)$$

Проведенный анализ внешних тепловых потоков учитывает орбиту, ориентацию космического аппарата относительно Солнца и Земли и результирующий тепловой поток в зависимости от положения створок жалюзи.

Библиографический список

1. Руководство для конструкторов по обеспечению тепловых режимов / В. А. Аксаментов, С. М. Беднов, С. В. Залетаев и др.; ГОНТИ. Т. 1. М., 1988. 130 с.
2. Панкратов, Б. М. Основы теплового проектирования транспортных космических систем / Б. М. Панкратов. М.: Машиностроение, 1988. 304 с.
3. Малоземов, В. В. Системы жизнеобеспечения экипажей летательных аппаратов / В. В. Малоземов, В. Ф. Рожнов, В. Н. Пращевский. М.: Машиностроение, 1986. 584 с.
4. Нестационарные тепловые режимы космических аппаратов спутниковых систем: моногр. / М. В. Краев, О. В. Загар, В. М. Краев, К. Ф. Голиковская; СибГАУ. Красноярск, 2004. 282 с.

К. Ф. Golikovskaja

MATHEMATICAL MODELLING OF THERMAL STREAMS SPACE VEHICLE

Calculation of external heat exchange of the space vehicle, taking into account solar and shadow orbits, with research of temperature fields of a space vehicle and definition of the making thermal streams which have been not connected to temperature sites of a surface is offered.

Н. Н. Горяшин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ НА БАЗЕ КВАЗИРЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Предложена математическая модель стабилизатора напряжения на базе понижающего квазирезонансного преобразователя с коммутацией ключевого элемента при нулевых значениях тока, позволяющая проводить динамический анализ подобных систем при больших возмущающих воздействиях.

При всех преимуществах резонансных преобразователей (РК) перед классическим импульсным преобразователем напряжения (ИПН) с прямоугольной формой тока и напряжения им не удастся оттеснить традиционные ИПН из-за принципиальных проблем, связанных с регулированием выходного напряжения. Эта проблема отчасти объясняется отсутствием точного моделирования динамических процессов подобных систем, а существующие модели [1] описываются приближенными линейными функциями.

Автором предлагается нелинейная непрерывная математическая модель стабилизатора напряжения (СН) на базе квазирезонансного преобразователя с переключением ключевого элемента (КЭ) при нулевых значениях тока (ПНТ), отображающая поведение напряжения на выходе системы во времени при ступенчатом изменении сопротивления нагрузки.

Один период работы КЭ в цепи резонансного контура (РК) ПНТ-преобразователя можно разбить на четыре временных интервала (рис. 1), которые описываются уравнениями [2]:

$$[0 \leq t < t_1]: \begin{cases} I_{Lp}(t) = \frac{U_{ax} \cdot t}{L_p}; \\ U_{Cp}(t) = 0; \\ \Delta t_1 = t_1 = \frac{I_n \cdot L_p}{U_{ax}} \end{cases} \quad (1)$$

$$[t_1 \leq t < t_2]: \begin{cases} I_{Lp}(t) = I_n + U_{ax} \cdot \frac{\sin(\omega_0(t-t_1))}{Z_0}; \\ U_{Cp}(t) = U_{ax}(1 - \cos(\omega_0(t-t_1))); \\ \Delta t_2 = t_2 - t_1 = \frac{1}{\omega_0} \cdot \arcsin\left(-\frac{Z_0 \cdot I_n}{U_{ax}}\right). \end{cases} \quad (2)$$

$$[t_2 \leq t < t_3]: \begin{cases} U_{Cp}(t) = -\frac{(t-t_2) \cdot I_n}{C_p} + U_{ax} \cdot (1 - \cos(\omega_0(t-t_1))); \\ I_{Lp}(t) = 0; \\ \Delta t_3 = t_3 - t_2 = \frac{C_p}{I_n} \cdot U_{ax} \cdot (1 - \cos(\omega_0(t-t_1))). \end{cases} \quad (3)$$

$$[t_3 \leq t < t_4]: \begin{cases} I_{Lp}(t) = 0; \\ U_{Cp}(t) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

где $I_{Lp}(t)$ – ток, проходящий через индуктивность РК L_p ; $U_{Cp}(t)$ – напряжение на конденсаторе РК C_p ; I_n – ток нагрузки; $U_{упр}(t)$ – напряжение управляющего сигнала; Z_0 – волновое сопротивление РК; U_{ax} – напряжение питания преобразователя; ω_0 – резонансная частота РК.

Согласно (1), (2) и временным диаграммам (рис. 1), время открытого состояния КЭ определяется суммой

$\Delta t_1 + \Delta t_2$. Это время является нелинейной функцией, зависящей от тока нагрузки в установившемся режиме, когда значение последнего равно среднему значению тока дросселя выходного фильтра. Если рассматривать систему в момент коммутации нагрузки, то в переходном режиме между током нагрузки и средним током дросселя фильтра наблюдается фазовый сдвиг. Поэтому при существенном изменении сопротивления нагрузки время интервала $\Delta t_1 + \Delta t_2$ будет изменяться в течение переходного процесса и примет другое значение в установившемся режиме. Учитывая такую особенность работы ПНТ-преобразователя, реализовать режим переключения при нулевых значениях тока в широком диапазоне нагрузок возможно в случае если управлять КЭ в соответствии с функциональной схемой (рис. 2), где при каждом периоде коммутации устройство, следящее за переходом тока через его нулевое значение, формирует запирающий сигнал и отправляет его на устройство управления КЭ.

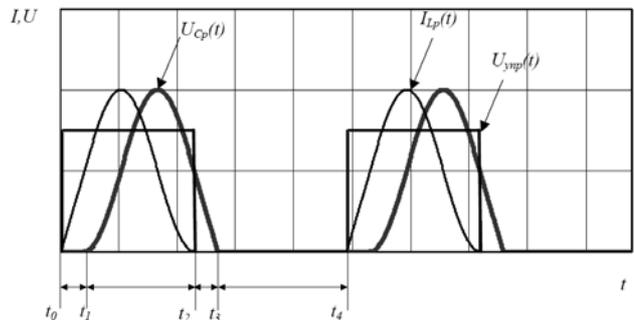


Рис. 1. Временные диаграммы работы ПНТ-преобразователя

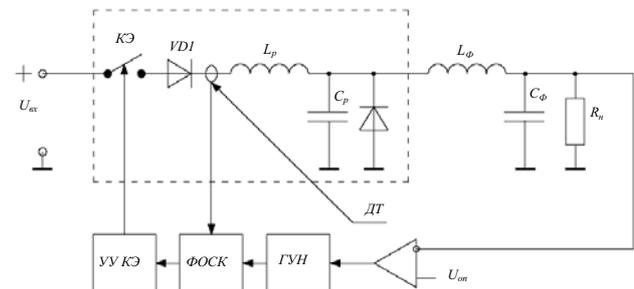


Рис. 2. Функциональная схема СН на базе квазирезонансного ПНТ-преобразователя: ГУН – генератор, управляемый напряжением; КЭ – ключевой элемент, ФОСК – формирователь времени открытого состояния КЭ; ДТ – датчик тока; $U_{он}$ – опорное напряжение; УУ КЭ – устройство управления КЭ

Прототип предлагаемой математической модели был описан в [3]. Его существенным недостатком является то, что КЭ в цепи РК нагружен идеальным источником тока,

а такая модель не учитывает особенности работы выходного $L_\phi C_\phi$ -фильтра преобразователя, который в свою очередь принимает участие в резонансном цикле. В связи с этим для исключения срыва резонансного процесса индуктивность дросселя фильтра рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить в нем режим непрерывного изменения тока. Поэтому на значение индуктивности дросселя накладывается обязательное ограничение: $L_\phi \gg L_p$ (примерно на порядок). Учитывая тот факт, что напряжение на резонансной емкости имеет фазовый сдвиг по отношению к току $I_{Lp}(t)$ (запаздывание) в соответствии с режимом ПНТ, то инерционностью устройства слежения за режимом ПНТ можно пренебречь.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что на время открытого состояния КЭ влияет не только среднее значение тока дросселя выходного фильтра, но и наложенное на него периодическое изменение тока – пульсация. На этом основании постановка задачи моделирования сводится к определению влияния пульсаций тока дросселя выходного фильтра на временные режимы работы КЭ в течение одного периода коммутации, а значит, и на динамику системы в целом.

Для дальнейшего анализа считаем, что полуволна тока за время $\Delta t_1 + \Delta t_2$ (см. рис. 1) имеет синусоидальную форму. Тогда форма тока через L_p будет выглядеть так, как показано на рис. 3. Регулирование выходного напряжения осуществляется посредством частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) за счет изменения среднего значения напряжения на конденсаторе РК в зависимости от текущей частоты коммутации, при условии, что собственная частота РК больше максимальной частоты коммутации.

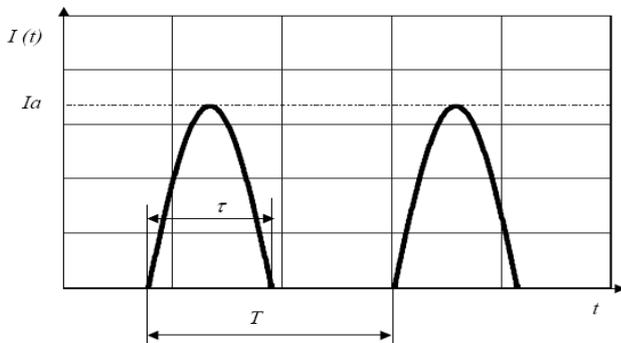


Рис. 3. Идеализированная временная диаграмма тока индуктивности резонансного контура ПНТ-преобразователя: I_a – амплитудное значение тока; t – длительность импульса соответствующая времени открытого состояния КЭ; T – период коммутации

Так как запасаемая энергия в индуктивности РК определяется током нагрузки, то зависимость длины импульса от среднего тока дросселя выходного фильтра можно вывести через эффективное значение тока $I_{эф}$ [4] индуктивности РК L_p :

$$\begin{cases} I_{эф} = I_a \cdot \sqrt{\frac{D}{2}}; \\ D = \frac{\tau}{T}. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя известную для нахождения амплитудного значения тока формулу $I_a = I_{эф} + U_{вх} / Z_0$ в (5), получим

$$D = \left[\frac{I_{эф}}{I_{эф} + \frac{U_{вх}}{Z_0}} \right]^2 \cdot 2 \quad (6)$$

Учитывая, что искомое выражение должно определять зависимость относительной длины импульса тока индуктивности РК от периодического изменения тока дросселя выходного фильтра за один период коммутации, его можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta D(I_{L\phi}) = \left[\frac{I_{L\phi} K_{П}(I_{L\phi})}{I_{L\phi} K_{П}(I_{L\phi}) + \frac{U_{вх}}{Z_0}} \right]^2 \cdot 2; \\ K_{П}(I_{L\phi}) = \frac{\Delta I_{L\phi}}{I_{L\phi}}. \end{cases} \quad (7)$$

где $\Delta I_{L\phi}$ – размах пульсаций тока дросселя выходного фильтра; $I_{L\phi}$ – среднее значение тока дросселя выходного фильтра.

На основании параметрической нелинейности (7), обусловленной нелинейной зависимостью коэффициента передачи ПНТ-преобразователя от тока нагрузки $K(I_{L\phi})$ [3], и модели выходного LC-фильтра [5] была синтезирована математическая модель СН на базе квазирезонансного ПНТ-преобразователя (рис. 4).

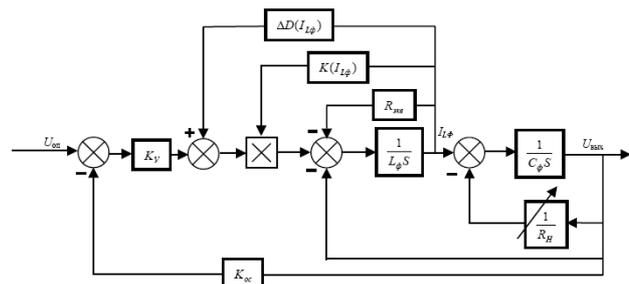


Рис. 4. Структурная схема непрерывной нелинейной модели СН на базе понижающего квазирезонансного ПНТ-преобразователя: $U_{он}$ – опорное напряжение, $R_{экв}$ – сопротивление, эквивалентное активному внутреннему сопротивлению ПНТ-преобразователя; $K_{ос}$ – коэффициент обратной связи; K_y – коэффициент усиления

Временные диаграммы процессов в силовой цепи СН без дополнительной коррекции, полученные в результате моделирования с использованием синтезированной нелинейной непрерывной модели и имитационного моделирования в пакете Micro-Cap 7.0, приведены на рис. 5. В этом пакете были рассчитаны все функциональные узлы ПНТ-преобразователя (см. рис. 2), при реализации которых были применены известные схемотехнические решения, а также учтены все динамические свойства реальных элементов. Это позволяет дать адекватную оценку точности синтезированной модели.

На основании проведенных исследований и полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- адекватность полученной модели подтверждается при исследовании электромагнитных процессов на ЭВМ с использованием имитационной модели в формате P-Spice, справедливость которой обосновывается результатами физических экспериментов [6];

– полученную модель можно применять для анализа динамических качеств СН, построенного на базе ПНТ-преобразователя, а также использовать как основной элемент методики синтеза закона управления, на основе известных методов исследования нелинейных систем;

– на основании выявленных параметрических связей и взаимовлияний энергетических режимов силовых цепей СН и его динамических свойств, можно выработать оптимальный режим работы системы путем совместного решения энергетической и динамической подзадач.

Библиографический список

1. Erickson, R. W. Fundamentals of Power Electronics / R. W. Erickson. First Ed. New York: Chapman and Hall, 1997. 791 p.
2. Дьяконов, В. П. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах / В. П. Дьяконов, А. А. Максимчук. М.: СОЛОН-Р, 2002. С. 512.

3. Горяшин, Н. Н. Особенности разработки резонансных преобразователей напряжения для систем электропитания космических аппаратов / Н. Н. Горяшин // САКС-2004: материалы междунар. науч.-практ. конф. / СибГАУ. Красноярск, 2004. С. 77–78.

4. Окснер, Э. С. Мощные полевые транзисторы и их применение / Э. С. Окснер. М.: Радио и связь, 1985. 288 с.

5. Frank, L. K. A simple Large Signal Nonlinear Modeling Approach for Fast Simulation of Zero-Current-Switch Quasi-Resonant Converters / L. K. Frank, H. Leung, K. S. Peter. IEEE Trans. Power Electron. Vol. 12. 1997. № 3. P. 437–442.

6. Горяшин, Н. Н. Исследование энергетических характеристик квазирезонансных преобразователей с целью их использования в системах электропитания космических аппаратов / Н. Н. Горяшин, А. Б. Базилевский // Вестник СибГАУ: сб. науч. тр. / под ред. Г. П. Белякова; СибГАУ. Вып. 5. Красноярск, 2004. С. 63–69.

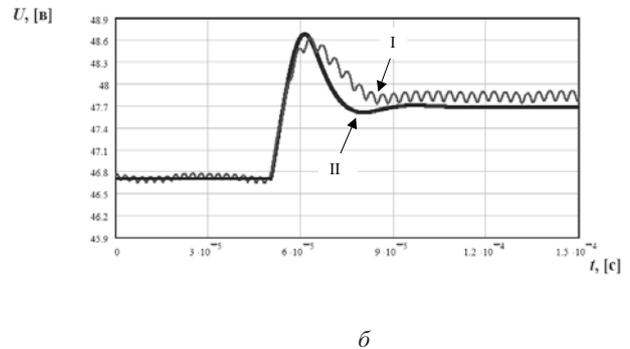
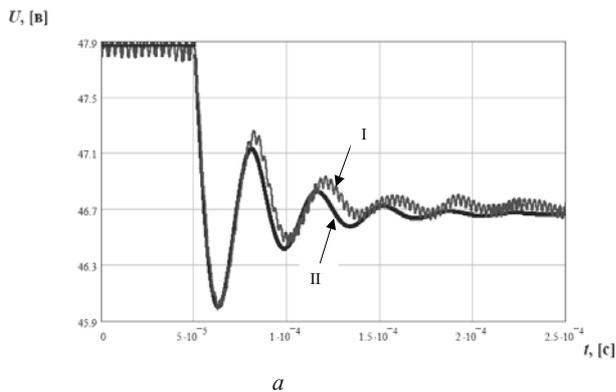


Рис. 5. Переходные процессы на выходе СН на базе квазирезонансного ПНТ-преобразователя при ступенчатом изменении сопротивления нагрузки 10...5 Ом (а), 5...10 Ом (б), полученные при помощи дискретной модели в формате P-Space (I) и непрерывной математической модели (II)

N. N. Gorjashin

MATHEMATICAL MODEL OF QUASI-RESONANT ZERO-CURRENT SWITCHING CONVERTER

In this article the mathematical model of quasi-resonant zero-current switching converter which allows to carry out dynamic analysis of such systems in large current stress is proposed.

М. Д. Евтифьев, Е. А. Лысенко

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Рассматривается вариант применения нейронных сетей для автоматизации вибрационных испытаний элементов конструкции летательных аппаратов.

Вибрация для ЛА (частотный диапазон 20...2 000 Гц, максимальное допустимое виброускорение 200 м/с²) является причиной усталостных разрушений элементов конструкции, сокращения ресурса работы двигателей, колебания корпуса. Вибрационные перегрузки вызывают механические повреждения аппаратуры и нарушение режима работы, а в отдельных случаях могут быть причиной неработоспособности аппаратуры [1].

Основное назначение вибрационных испытаний, как и всех других видов испытаний ЛА, – это проверка и обеспечение работоспособности и надежности разрабатываемых ЛА. С помощью этих испытаний проверяются состояние и характеристики элементов ЛА. При выявлении отклонения отдельных характеристик от заданных значений производится доводка элементов конструкции ЛА до требований технического задания (ТЗ).

В состав виброиспытаний входят два основных вида испытания – на вибропрочность и виброустойчивость, которые могут быть реализованы следующими методами:

- испытанием гармонической вибрацией на фиксированных частотах;
- испытанием гармонической вибрацией с использованием метода качающейся частоты;
- испытанием полигармонической вибрацией;
- испытанием широкополосной случайной вибрацией;
- испытанием узкополосной случайной вибрацией;
- испытанием реальной вибрацией [2].

Большинство экспериментальных методов определения собственных частот, форм колебаний и коэффициентов демпфирования элементов конструкции ЛА основано на возбуждении гармонических колебаний объектов. Соответствующая математическая модель имеет вид

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = F \sin \omega t,$$

где A, B, C – соответственно матрицы инерции, демпфирования и жесткости; q – вектор обобщенных координат (за обобщенные координаты принимаются абсолютные перемещения точек системы); F – матрица-столбец амплитуд внешних сил F_1, F_2, \dots, F_n [3].

Так как конечные результаты виброиспытаний имеют большое значение для дальнейшей эксплуатации ЛА, то для более качественного и быстрого получения этих результатов особое внимание следует уделять автоматизации виброиспытаний.

Одним из наиболее перспективных вариантов решения вопросов автоматизации любых испытаний, в том числе и виброиспытаний, является применение в процессах управления и обработки информации испытаний элементов искусственного интеллекта (ЭИИ). В настоящее время наиболее развитыми и используемыми для

процессов испытаний являются такие ЭИИ, как экспертные системы (ЭС) и нейронные сети (НС).

Задачу автоматизации для виброиспытаний можно решить путем введения в контур управления информационного обмена виброустановок программно-аппаратных средств с ЭС или НС.

Хорошо известно, что экспертные системы являются значительным практическим достижением в области искусственного интеллекта, получившим всеобщее признание. О роли и значимости ЭС можно судить по объемам финансирования этих работ. Особенно в данной области преуспели США и Япония. Россия все еще находится в начале пути и не достигла высокого уровня в направлении применения ЭС в процессах диагностики и испытаний [4].

Для испытаний ЛА наиболее важной является одна из особенностей экспертных систем – использование неформализованных и эвристических знаний при решении определенного круга задач в данной предметной области. Экспертная система – это система искусственного интеллекта общего назначения, предназначенная для решения неформализованных, т. е. основанных на не точном знании, задач.

Экспертные системы характеризуются следующими способностями, необходимыми в процессе испытаний и диагностики:

- они могут формировать и пояснять свои действия и сообщения;
- работать с нечеткой информацией;
- обобщать свойства проектных решений и делать из этого обобщения выводы о том, какие действия целесообразно выполнять дальше;
- расширяться путем добавления новых знаний;
- использовать описательное представление знаний, которое легко взаимодействует с естественным языком [5; 6; 7].

В последнее время активно стало развиваться другое направление ЭИИ – нейронные сети.

Теория нейронных сетей включают широкий круг вопросов из разных областей науки: биофизики, математики, информатики, схемотехники и технологии. Поэтому понятие «нейронные сети» детально определить сложно.

Искусственные нейронные сети представляют собой сеть элементов – искусственных нейронов, связанных между собой синаптическими соединениями. Работа сети состоит в преобразовании входных сигналов во времени, в результате чего меняется внутреннее состояние сети и формируются выходные воздействия. Обычно нейронные сети оперируют цифровыми, а не символьными величинами.

Большинство моделей НС требуют обучения. В общем случае обучение – это такой выбор параметров сети, при котором сеть лучше всего справляется с поставленной проблемой. Обучение – это задача многомерной оптимизации, и для ее решения существует множество алгоритмов.

Искусственные нейронные сети являются набором математических и алгоритмических методов для решения широкого круга задач. Искусственные НС как универсальный инструмент для решения испытательных задач обладают следующими характерными чертами:

- а) НС – средство обработки информации:
 - гибкая модель для нелинейной аппроксимации многомерных функций;
 - средство прогнозирования во времени для процессов, зависящих от многих переменных;
 - классификатор по многим признакам, позволяющий разделить входное пространство на области;
 - средство распознавания образов;
 - инструмент для поиска по ассоциациям;
- е) модель для поиска закономерностей в массивах данных;
- б) НС свободны от ограничений обычных компьютеров благодаря параллельной обработке и сильной связанности нейронов [8].

Основные задачи, решаемые нейронными сетями являются следующие:

- нелинейная аппроксимация многомерных функций;
- средство прогнозирования во времени для процессов, зависящих от многих переменных, – нелинейное моделирование в управлении процессами;
- классификатор по многим признакам – определение класса состояния в диагностике;
- распознавание зрительных, слуховых образов – акустический анализ ДУ, управление акустическими испытаниями; распознавание скрытых дефектов на рентгенограммах изделий, в сварных швах, поиск течи при испытаниях на герметичность, при аэродинамических испытаниях, анализ видео- и фотоснимков обтекания тел потоком газа; спектральный анализ;
- поиск по ассоциациям – ассоциативный поиск информации и создание ассоциативных моделей;
- поиск закономерностей в массивах данных;
- формирование моделей и различных нелинейных и трудно описываемых математических систем, прогнозирование развития этих систем во времени (системы управления и регулирования с предсказанием: управление стендами, другими сложными устройствами, принятие решений и диагностика, исключаяющие логический вывод, особенно в областях, где отсутствуют четкие математические модели) [9].

Применение НС имеет большее значение в сфере испытаний, чем ЭС, так как круг задач, решаемых нейронными сетями в сфере испытаний, шире, чем у экспертных систем. Это связано с их умением распознавать, обобщать, предсказывать, ассоциировать. К тому же на разработку НС (несколько месяцев) необходимо затратить меньше времени и средств, чем на разработку ЭС (несколько лет). Однако не стоит забывать о комбинированных системах, например НС, способных объяснить свое решение и т. д.

Рассмотрим реальный вариант автоматизации виброиспытаний элементов конструкции ЛА с применением НС на примере, уже существующей электродинамической виброустановки, созданной в 90-х гг. XX в. [10] (рис. 1).

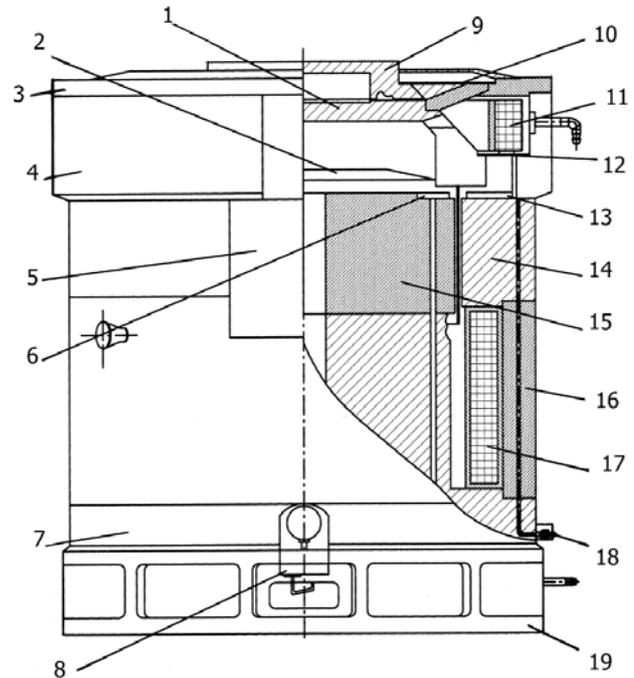


Рис. 1. Схема вибростенда: 1 – экран; 2 – камера; 3 – крышка; 4 – основание; 5 – плата; 6, 13 – водораспределительное кольцо; 7 – основание; 8 – питающее; 9 – стол с подвижной катушкой; 10 – мембрана верхняя; 11 – катушка размагничивания; 12 – мембрана нижняя; 14, 15 – крышки; 16 – кольцо; 17 – катушка подмагничивания; 18 – гидроклапан; 19 – основание

Конструктивно в состав установки входят шесть составных частей:

- генератор низкочастотных управляющих сигналов;
- усилительное устройство (УУ);
- питающее устройство (ПУ);
- электродинамический вибростенд, состоящий из электромагнита, подвижной системы, системы размагничивания, системы водоохлаждения;
- вентилятор;
- согласующий усилитель (СУ) [10].

Части установки соединяются между собой электрическими кабелями.

Установка работает следующим образом: с выхода генератора низкочастотных сигналов напряжение синусоидальной формы, усиленное УУ через ПУ, подается на вход вибростенда. В вибростенде это напряжение преобразуется в механические колебания синусоидальной формы той же частоты. Имеется отрицательная обратная связь на вход генератора сигналов от пьезодатчика через СУ. Режим испытания задается генератором сигналов.

Электродинамическую силу, вызывающую перемещение подвижной обмотки и присоединенных к ней частей и создающую при взаимодействии тока в подвижной обмотке с постоянным магнитным полем, можно определить по формуле

$$F = (Bl)i \sin \alpha,$$

где B – магнитная индукция в зазоре; l – длина проводника в магнитном поле (длина части проводника подвижной обмотки, находящейся в зазоре); i – ток в подвижной обмотке; α – угол между направлением тока в проводнике и силовыми линиями магнитного поля.

Ускорение, получаемое столом вибростенда с объектом испытания, зависит от амплитуды и частоты вибрации и определяется по формуле

$$a = Af^2 / 250,$$

где a – ускорение в долях земного притяжения; A – амплитуда виброперемещений; f – частота вибраций.

Функциональная схема рассматриваемой виброустановки приведена на рис. 2.

На этом вибростенде проверяется поведение сварных швов элементов конструкции ЛА (фланцы, трубопроводы, переходники, шар-баллоны и т. д.) [10]. Особых ограничений при испытаниях элементов конструкции ЛА нет, благодаря с наличию специальных приспособлений для установки на рабочий стол каждого типа деталей. Главное требование касается размеров рабочей зоны изделия, которая должна быть не менее 500 мм. Максимальный размер детали и узлов ограничивается размерами помещения, в которых проводятся испытания; масса испытываемого объекта вместе с приспособлением не должна превышать 100 кг [10].

Объекты испытаний поступают на виброиспытания с предварительно рассчитанными конструктором эксплуатационными параметрами, которые формируют режим виброиспытаний (см. таблицу).

Анализ существующего оборудования, необходимого для автоматизации рассматриваемой виброустановки, показывает, что для этих целей можно использовать оборудование фирмы «L-Card» как наиболее доступное. В частности, блоки LTC модульной системы сбора данных с разно-

образных датчиков и управления нашли широкое применение в решении задач промышленной и лабораторной автоматизации, включая задачи с повышенными требованиями к качеству измерительных трактов (0,1 % и выше), а также задачи, в которых необходимо измерять и управлять большим количеством разнородных сигналов [11].

При проведении виброиспытаний, целью которых является определение резонансных частот, форм колебаний и коэффициентов демпфирования и жесткости объектов испытаний, в качестве ядра автоматизированного комплекса управления и обработки данных можно использовать нейронные сети, решающие задачу классификации объектов по набору параметров. Из нескольких методов свободных колебаний был выбран резонансный метод, так как он наиболее удобен при реализации НС для определения частоты резонанса по ее кривой.

После анализа имеющегося программного обеспечения (ПО) в области ЭИИ был сделан вывод, что готового ПО для автоматизированных комплексов не существует. Авторы предлагают использовать универсальную библиотеку «NeuroWindows» от WSG Inc, которая включает все основные архитектуры нейронных сетей и методы обучения. На ее основе можно разработать программные комплексы любой сложности для решения широкого круга задач. Такой метод внедрения НС будет наиболее выгоден с точки зрения затрат времени и средств на разработку, так как нет необходимости разрабатывать ПО с нуля.

Блок-схема автоматизированной виброустановки (рис. 3) состоит из 4 блоков.

В блок 1 входит персональный компьютера (ПК), две платы асинхронного цифрового ввода-вывода на шину ISA и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на шину ISA.

Блоки 2 и 3 являются крейт-блоками для снятия сигналов с датчиков и преобразования их в цифровые сигналы. Они

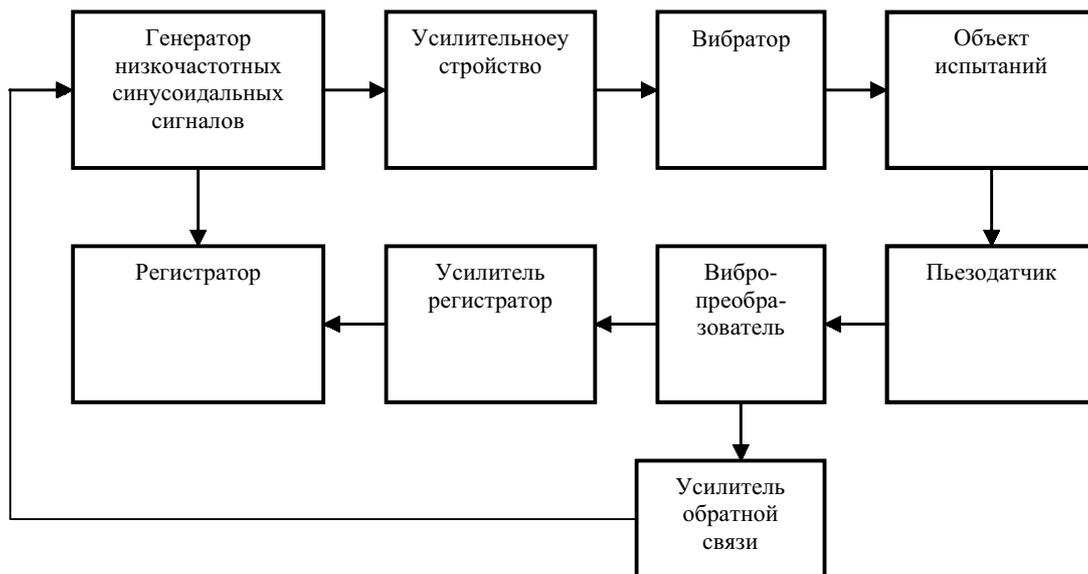


Рис. 2. Функциональная схема виброустановки

Параметры	Значения				
Диапазоны частот, Гц	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60
Амплитуда виброускорений, м/с ²	19,62–49,05	49,05–58,86	58,86–98,1	98,1	98,1–196,2
Время испытаний, с	120	120	120	120	120

состоят из контроллера, обеспечивающего управление установленными в крейте модулями и обменом информацией с ПК, модуля вывода дискретных сигналов с гальваноразвязкой, генератора аналоговых сигналов, многофункционального модуля ввода-вывода дискретных сигналов, предназначенного для ввода-вывода цифровых данных и управления приборами, АЦП для снятия данных с датчиков.

Блок 4 представляет собой вибростенд с приспособлениями и объектом испытаний, а также с датчиками, установленными на объект.

В отличие от старой схемы новая схема на базе блоков LTC более мобильна, функциональна и обеспечивает повышение качества испытаний. Данная схема также может быть применена к любому типу виброиспытаний. Время ввода и обработки данных при такой автоматизации значительно сокращается. Для обслуживания виброиспытаний требуется всего один оператор. Затраты на приобретение оборудования и программного обеспечения для такой автоматизации по расчетам могут окупиться за 1 год.

Библиографический список

1. Соустин, Б. П. Виброиспытания космических аппаратов / Б. П. Соустин. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2000.

2. Измерения и испытания: справ. / пред. ред. совета В. Н. Челомей. М.: Машиностроение, 1981. Т. 5.

3. Афанасьев, В. А. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В. А. Афанасьев, М.: Машиностроение, 1994.

4. Искусственный интеллект. Системы общения и экспертные системы: справ. / под ред. Э. В. Попова. М.: Радио и связь, 1990.

5. Попов, Э. В. Экспертные системы. Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ / Э. В. Попов. М.: Наука, 1987.

6. Построение экспертных систем: пер. с англ. / под ред. Ф. Хейеса-Рота, Д. Уотермана, Д. Лената. М.: Мир, 1987.

7. Джексон, П. Введение в экспертные системы: пер. с англ. / П. Джексон. М.: Вильямс, 2001.

8. Мкртчян, С. О. Нейронные сети. Введение в теорию формальных нейронов / С. О. Мкртчян. М.: Энергия, 1971.

9. Суровцев, И. С. Нейронные сети / И. С. Суровцев, В. И. Клюкин, Р. П. Пивоваров; ВГУ. Воронеж, 1994.

10. Вибрация в технике. Вибрационные процессы и машины: справочник / председ. ред. совета В. Н. Челомей. М.: Машиностроение, 1981. Т. 4.

11. Описание крейтовой системы LTC / ЗАО «L-card». М., 1999.

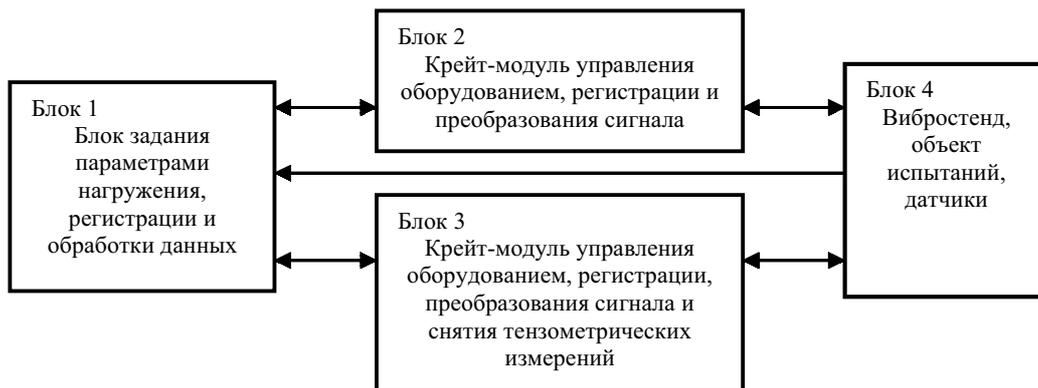


Рис. 3. Блок-схема автоматизированной виброустановки

М. D. Evtifjev, E. A. Lysenko

NEURAL NETWORK BASED AUTOMATION FOR VIBRATION TESTING THE SPACE VEHICLE STRUCTURAL ASSEMBLIES

In the paper it is considered an application of the neural networks for automation of vibration testing of space vehicle structural assemblies.

В. Н. Ефремов, В. Ю. Журавлев, К. В. Ефремов, С. П. Мясников

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫВОРАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАЗДЕЛИТЕЛЕЙ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

Рассматривается математическая модель процесса выворачивания металлического разделителя топливного бака космического летательного аппарата. Структура математической модели определена на основе качественного анализа закономерностей, выявленных при экспериментальном исследовании процесса выворачивания разделителя. Параметры математической модели определяются на основе количественного анализа результатов эксперимента по выворачиванию разделителя – ближайшего прототипа.

Нормальную подачу жидкого компонента топлива из бака к двигателю осуществить в условиях невесомости без специальных конструкторских приспособлений, отделяющих жидкую фазу от газообразной, особенно при многократном включении, трудно. Форма и расположение газового пузыря будут зависеть от формы бака и конструкции заборных магистралей, соотношения количества жидкости и газа в баке, возникающих внешних сил. Гарантированное разделение газовой и жидкой фазы происходит при механическом разделении, наиболее эффективном при использовании металлических разделителей фаз.

Разделительное устройство должно обеспечивать герметичность при перемещении разделителя и длительном хранении компонента, удовлетворять требованию центровки двигательной установки, иметь малый перепад давлений на разделителе.

Если технология снаряжения разделителем топливного бака и технология заправки топливом для всех систем одинаково сложны, то технология изготовления выворачивающихся разделителей с монотонным профилем образующей проще, а следовательно, экономичнее. Эти же схемы лучше и по другим характеристикам: весу, полной выработке компонентов, компенсации температурных расширений, отсутствию химической проницаемости компонентов, технологическим требованиям.

Для создания методики проектирования выворачивающихся металлических разделителей на основе экспериментальных результатов была разработана математическая модель на основе уточненной физической модели процесса деформирования тонкостенной оболочки.

Анализ результатов испытаний показал, что деформирование разделителя на всем протяжении процесса выворачивания носит четко выраженный характер и сосредоточено в малом объеме торовой зоны перекачивания. Под действием распределенного давления в результате деформации зоны перекачивания деформированная часть разделителя перемещается относительно его недеформированной части. Для топливных баков с диаметром 400...600 мм и толщиной разделителя 0,5...2,0 мм деформации меридиана на расстоянии n от срединной поверхности при переходе от недеформированной зоны с кривизной $1/R$ в зону перекачивания с кривизной $1/r$ составит

$$\varepsilon_m = \frac{n}{R+n} R \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right),$$

т. е. не менее n/r . Для указанных выше размеров на поверхности они будут равны 0,1...0,2. Величина деформаций параллелей и меридианов срединной поверхности

по выходе из зоны перекачивания составит 0,02...0,03 на основном участке процесса деформации. Для некоторых материалов (например, АД-1М) механические характеристики $\delta = f(\varepsilon)$ таковы, что практически вся зона перекачивания, за исключением небольшого участка, является зоной пластических деформаций, а деформации охватывают большую часть зоны возможных деформаций.

Для материала АД-1М, согласно ГОСТ 10703–73, модуль упругости $E = 0,71 \cdot 10^5$ Мн/м², а временное сопротивление $s_b = 0,8$ Мн/м², т. е. возможные упругие деформации меньше величины $\delta_e / E = 1,1 \cdot 10^{-3}$. Эта величина на несколько порядков меньше величины деформации в зоне перекачивания. Область пластических деформаций достаточно протяженна ($\varepsilon_e = 0,35$) и пологая ($\delta_s = 0,5$ Мн/м², $\delta_e = 0,8$ Мн/м²).

Сказанное выше дает основание заменить реальную характеристику $\delta = f(\varepsilon)$ прямой, параллельной оси абсцисс (оси ε), с координатой $\delta = \delta_e$, т. е. идеально пластической характеристикой механических свойств материала. Это обстоятельство не приведет к существенным погрешностям в расчете величин давления выворачивания, так как абсолютные значения напряжений для выбранного материала малы.

Для идеально пластического тела пластическое течение определяется конечной комбинацией нагрузок, путь нагружения, начальные напряжения и деформации при этом не учитываются. Поэтому, используя экстремальный (энергетический) принцип для идеально пластического тела, составлено уравнение, характеризующее минимальные свойства действительного поля скоростей для определения основных параметров процесса пластического выворачивания разделителя.

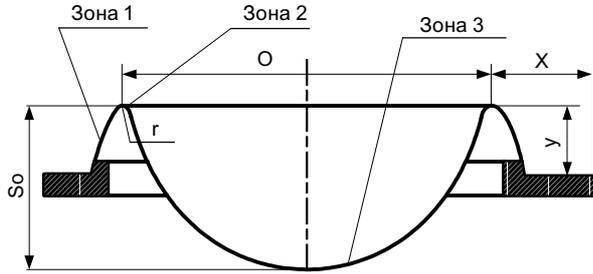
Кроме того, расчеты деталей, выполненных из пластических материалов рекомендуется выполнять с использованием энергетического принципа, что подтверждено результатами экспериментов:

$$\int_F X_{ni} V_{ni} dF \leq \tau_s \int_V H' dV,$$

X_{ni} – поверхностная нагрузка; V_{ni} – скорость перемещения поверхности; F – движущаяся в результате деформации поверхность; τ_s – предел текучести при сдвиге; H' – кинематически возможная интенсивность скоростей деформации; V – объем пластической зоны.

Кинематика процесса выворачивания представляется как процесс перекачивания тора по поверхности разделителя. Деформируется только область торовой поверхности разделителя. Она делит оставшуюся часть разде-

лителя на две зоны, перемещающиеся параллельно оси деформации в разных направлениях относительно друг друга (см. рисунок). Процесс деформации симметричен, поэтому его рассматривают в плоскости меридионального сечения.



Зоны разделителя при пластическом выворачивании

Меридиан срединной поверхности невывернутой части разделителя рассматривается как неподвижная кривая (неподвижная центроида), по которой катится без скольжения срединная окружность сечения торовой поверхности зоны перекатывания. Тогда скорость любой точки этой окружности геометрически складывается из скорости движения центра окружности (полюса) и скорости точки в ее вращательном движении вокруг центра С:

$$\vec{V}_M = \vec{V}_C + \vec{V}_{MC}.$$

Точка касания меридионального сечения и сечения зоны перекатывания H является мгновенным центром скоростей. Приняв точку C за полюс, перемещающийся со скоростью \vec{V}_C , определяют вектор скорости мгновенного центра скоростей H как сумму вектора скорости полюса \vec{V}_C и вектора скорости вращательного движения вокруг полюса \vec{V}_{MC} :

$$\vec{V}_H = \vec{V}_C + \vec{V}_{MC} = 0.$$

Угловая скорость вращательного движения

$$\omega = \frac{V_{HC}}{r} = \frac{V_C}{r}.$$

Кроме того, каждая точка M сечения торовой поверхности, отстоящая от срединной торовой поверхности на расстояние S , за счет деформации меридиана получит относительное перемещение вдоль соответствующей окружности с относительной скоростью. За время dt точка M по дуге меридиана торовой поверхности переместилась бы при неизменном меридиане на величину

$$dl = \omega(r + s)dt.$$

Относительную угловую скорость вращательного движения определяют по выражению

$$\omega_{отн} = \frac{V_{отн}}{r + s} = \omega \epsilon_M.$$

Абсолютная скорость произвольной точки M в меридиональном сечении тора составит

$$\vec{V}_M = \vec{V}_C + \vec{V}_{MC} + \vec{V}_{Mотн}.$$

скорость точки M во вращательном движении вокруг полюса C

$$V_{MC} = \omega(r + s);$$

скорость относительного движения точки M

$$V_{Mотн} = \omega(r + s) \cdot \epsilon_M.$$

Вся деформированная и центральная часть перемещается поступательно вдоль оси Y . При поступательном движении скорости всех точек тела равны между собой. Поэтому скорость перемещения деформированной и центральной зоны определяется скоростью на ее границе с зоной деформации в проекции на координатную ось Y :

$$V_{выу} = -(V_{вс} + V_{вотн}) \cdot \sin \varphi + (V_{вс} + V_{вотн}) \cdot \sin(\varphi - \alpha_n)$$

На основном участке тора за счет смещения материала диафрагмы-разделителя происходит изменение длины параллели. При осевой симметрии это изменение пропорционально изменению расстояния $2X_{Mc}$ между диаметрально противоположными точками. Скорость изменения параллели зависит от скорости удаления диаметрально противоположных точек друг от друга или от скорости изменения расстояния от рассматриваемой точки до оси симметрии. Следовательно, скорость деформации параллели определится отношением проекции скорости в точке на ось X к расстоянию от точки до оси симметрии.

Интенсивность скоростей деформации определяется по формуле

$$H' = \sqrt{\frac{2}{3} \sqrt{(\eta_1 - \eta_2)^2 + (\eta_2 - \eta_3)^2 + (\eta_3 - \eta_1)^2}}.$$

Скорости деформации для пластической зоны связаны условием неизменности объема как производные по времени от деформаций:

$$\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 = 0.$$

Согласно этому условию деформация параллели определяется по зависимости

$$H' = 2|\eta_n|.$$

Энергию поверхностного нагружения можно представить выражением

$$\begin{aligned} \int_F X_{ni} V_{ni} dF &= \int_F P \cos(PY) \cdot V_y dF = \\ &= -P2\pi \int_0^{X_M} [-(V_{MC} + U_{Mотн}) \cdot \sin(\varphi - \alpha_M)] + \\ &+ [(V_{вс} + V_{вотн}) \cdot \sin(\varphi - \alpha_n)] x dx \end{aligned}$$

После преобразований уравнение энергетического принципа запишется в виде

$$\begin{aligned} \int_F X_{ni} V_{ni} dF &= 2\pi P \omega \cdot (r + \delta) \cdot (1 + \epsilon_M) \cdot \\ &\cdot \sin \varphi \cdot (1/2 X_H^2 + 1/2 X_n^2 + 2/3 r^2 \sin^2 \varphi) \end{aligned}$$

Величину энергии внутренних сил при перемещении разделителя вычисляют по энергии зоны перекатывания:

$$\begin{aligned} \tau_s \int_V H' dV &= 4\tau_s \pi \omega r S \left[\frac{X_c}{r} \frac{S}{2} (1 + \epsilon_M) + \right. \\ &+ r - \cos \varphi 2\varphi + 2 \sin \varphi + (1 + S/r) / 4\epsilon_M \sin \varphi \left. \right], \end{aligned}$$

После преобразований получают

$$\begin{aligned} 2\pi P \omega (r + S) \cdot (1 + \epsilon_M) \sin \varphi / 2 (X_c^2 + X_n^2 + 4/3 r^2 \sin^2 \varphi) = \\ = 4\tau_s \pi \omega r S \cdot \left[\frac{X_c}{r} \frac{S}{2} (1 + \epsilon_M) + r \cdot (-\cos \varphi 2\varphi + \right. \\ \left. + 2 \sin \varphi + (1 + S/r) / 4\epsilon_M \sin \varphi \right]. \end{aligned}$$

Отсюда рассчитывают давление выворачивания:

$$P = 2\tau_c S \frac{\frac{X_c S}{r} (1 + \varepsilon_m) + 2r \left(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi + \frac{1}{8} \varepsilon_m \sin \varphi \right)}{X_c^2 \sin \varphi \left(1 + 7/3 \frac{r^2}{X_c^2} \sin^2 \varphi \right) \left(1 + \frac{S}{r} \right) (1 + \varepsilon_m)}$$

При выворачивании с отрицательной деформацией параллели величины ε_m , S/r и r/X_c малы, поэтому давление

$$P = 2\tau_c S \frac{\frac{X_c S}{r} + 2r(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi)}{X_c^2 \sin \varphi}$$

Вторая производная этого выражения положительна. Приравняв выражение к нулю, находят величину радиуса зоны перекачивания, отвечающую минимуму энергии деформации:

$$-\frac{X_c S}{2} \frac{1}{r^2} + 2(\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) = 0.$$

Отсюда величина радиуса зоны перекачивания

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{X_c S}{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi}}$$

Теперь давление выворачивания

$$P = \frac{2\tau_c S}{X_c^2 \sin \varphi} \left[\frac{X_c S}{2} \frac{2\sqrt{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi}}{\sqrt{X_c S}} + \sqrt{\frac{X_c S}{\sin \varphi - \varphi \cos \varphi}} (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi) \right]$$

или

$$P = \frac{4\tau_c S}{X_c^2 \sin \varphi} \sqrt{X_c S (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi)}$$

Таким образом, получены теоретические значения основных параметров процесса выворачивания металлической диафрагмы-разделителя при отрицательной деформации параллели: радиус зоны перекачивания и давление выворачивания в зависимости от положения зоны перекачивания на диафрагме-разделителе. Это дает возможность определить другие необходимые для проектирования диафрагмы-разделителя в составе топливного бака характеристики процесса выворачивания диафрагмы-разделителя и опорожнения бака.

V. N. Efremov, V. U. Zhuravlev, K. V. Efremov, S. P. Mjasnikov

MATHEMATICAL MODEL OF THE INSIDE OUT METALLIC SEPARATORS FUEL TANK

In article is considered mathematical model of the inside out metallic separators fuel tank of the cosmic flying machine. The Structure to mathematical model is determined on base of the qualitative analysis of the regularities, revealed under experimental study of the process of inside out separator. The Parameters to mathematical model defining on base of the quantitative analysis result experiment on inside out separator – a nearest prototype.

А. А. Кишкин, М. В. Краев, А. А. Зуев

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА

Проведен обзор различных способов интенсификации конвективного теплообмена, разработана экспериментальная установка и методика исследования, приведены предварительные результаты исследований эффективности применения способов интенсификации теплообмена.

Теплообменные аппараты нашли широкое применение во многих областях хозяйственной деятельности, авиационно-космической, энергетической, химической, нефтеперерабатывающей, пищевой промышленности, холодильной и криогенной технике, в системах отопления, горячего водоснабжения, кондиционирования, различных тепловых двигателях. В связи с ростом энерговооруженности космических аппаратов, энергонапряженности устройств, повышением требований к возможным режимам регулирования систем достаточно актуально стоит вопрос изучения возможных процессов интенсификации теплообмена. Уменьшение массогабаритных характеристик теплообменников за счет процессов интенсификации особенно имеет большое значение в ракетно-космической технике. Такой процесс позволит увеличить массу полезного груза, выводимого на орбиту, при тех же энергозатратах и в целом повысить тактико-технические характеристики ракетносителей и космических аппаратов.

Опыт создания и эксплуатации различных теплообменных аппаратов показал, что разработанные к настоящему времени методы интенсификации теплообмена обеспечивают снижение габаритов и металлоемкости (массы) устройств в 1,5...2,0 и более раза по сравнению с аналогичными серийно выпускаемыми устройствами при одинаковой тепловой мощности и мощности используемой на прокачку теплоносителей.

В настоящее время предложены и исследованы разнообразные методы интенсификации конвективного теплообмена. Применительно к течению однофазных теплоносителей используются турбулизаторы потока на поверхности, шероховатые поверхности и поверхности, развитые за счет оребрения, закрутка потока спиральными ребрами, шнековыми устройствами, завихрителями, установленными на входе в канал, подмешивание к потоку жидкости газовых пузырей, а к потоку газа – твердых частиц или капель жидкости, вращение или вибрация поверхности теплообмена, пульсации теплоносителя, воздействие на поток электростатических полей, отсос потока из пограничного слоя, струйные системы. Эффективность интенсификации для разных способов при существенно различных затратах энергии различна.

Интенсификация теплообмена при использовании периодически кольцевых выступов. Это один из наиболее эффективных и исследованных способов интенсификации. Стоит отметить, что накатка кольцевых канавок достаточно технологична, так как не увеличивает наружный диаметр труб, позволяя использовать данные трубы в тесных пучках и не менять существующей технологии сборки теплообменных аппаратов. Кольцевые диафрагмы и канавки турбулизируют поток в пристен-

ном слое и обеспечивают интенсификацию теплообмена снаружи и внутри труб.

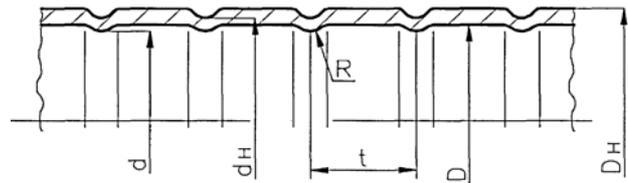


Рис. 1. Продольный разрез трубы с кольцевой накаткой

Для труб с кольцевыми турбулизаторами получены обобщающие зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса Re , шага расположения турбулизаторов t/D и высоты турбулизатора d/D . Во всех нижеприведенных зависимостях при вычислении коэффициентов теплоотдачи в трубах с кольцевыми турбулизаторами и в пучках труб увеличение поверхности теплообмена не учитывалось, т. е. плотность теплового потока определялась по поверхности гладкой трубы.

При расчете Re и ξ скорость потока находят по проходному сечению гладких каналов. Опытные данные по средней теплоотдаче при нагревании и охлаждении газов ($T_{cm}/T_n = 0,13...1,6$) обобщают формулами, погрешность которых составляет $\pm 12\%$:

$$\frac{Nu}{Nu_{zn}} = \left[1 + \frac{\lg Re_n - 4,6}{35} \right] \left\{ 3 - 2 \cdot \exp \left[\frac{-18,2(1 - d/D)^{1,13}}{(t/D)^{0,326}} \right] \right\}$$

(формула справедлива при $d/D = 0,88...0,98$ и $t/D = 0,25...0,8$);

$$\frac{Nu}{Nu_{zn}} = \left[1 + \frac{\lg Re_n - 4,6}{30} \right] \left[\left(3,33 \frac{t}{D} - 16,33 \right) \frac{d}{D} + 17,33 - 3,33 \frac{t}{D} \right]$$

(формула справедлива при $d/D = 0,88...0,98$ и $t/D = 0,8...2,5$).

В обеих формулах число Re берут при среднемассовой температуре газа.

Для $d/D = 0,9...0,97$ и $t/D = 0,8...2,5$ можно использовать следующую формулу:

$$\frac{Nu}{Nu_{zn}} = \left[1 + \frac{\lg Re_{cm} - 4,6}{7,45} \right] \left[\frac{1,14 - 0,28 \sqrt{1 - \frac{d}{D}}}{1,14} \right] \exp \left(\frac{9(1 - d/D)}{(t/D)^{0,58}} \right)$$

где Re_{cm} определяют по среднемассовой температуре стенки.

Число Нуссельта Nu_{zn} рассчитывают по следующим зависимостям:

– при нагревании газов

$$Nu_{zn} = 0,0207 Re^{0,8} Pr^{0,43},$$

где определяющая температура – средняя по длине трубы температура стенки;

– при охлаждении газов

$$Nu_{гр} = 0,0192 Re^{0,8} Pr^{0,43},$$

где определяющая температура – средняя по длине трубы температура стенки, или

$$Nu_{гр} = 0,018 Re^{0,8},$$

где определяющая температура – среднemasовая по длине трубы.

Приведенные выше формулы справедливы в диапазоне чисел $Re = 10^4 - 4 \cdot 10^5$.

Средняя теплоотдача для капельных жидкостей при $t/D = 0,5$ и $d/D \geq 0,94$ составляет

$$Nu / Nu_{гр} = [100(1 - d/D)]^{0,445}.$$

Здесь $Nu_{гр}$ рассчитывают по формуле

$$Nu_{гр} = 0,0216 Re^{0,8} Pr^{0,445},$$

где определяющая температура – среднemasовая температура жидкости по длине трубы.

Данные по коэффициентам гидравлического сопротивления обобщают с погрешностью $\pm 12\%$ в диапазоне $Re = 10^4 - 4 \cdot 10^5$ следующими зависимостями:

– для $d/D = 0,9...0,97$ и $t/D = 0,5...10,0$

$$\frac{\xi}{\xi_{гр}} = \left[1 + \frac{100(\lg Re - 4,6)(1 - d/D)^{1,65}}{\exp(t/D)^{0,3}} \right] \exp \left[\frac{25(1 - d/D)^{1,32}}{(t/D)^{0,75}} \right],$$

где

$$\xi_{гр} = \frac{0,316}{Re^{0,254}} \left(\frac{\mu_n}{\mu_c} \right)^n,$$

здесь $n = 0,14$ для нагревания газов, $n = 0$ для охлаждения газов, $n = 1/3$ для нагревания жидкостей;

– для $d/D = 0,88...0,98$ и $t/D = 0,5$

$$\frac{\xi}{\xi_{гр}} = \left[1 + \frac{\lg Re - 4,6}{3,4 \frac{Re}{10^5} + 6} \right] (1,3 - \sqrt{d/D - 0,93}) \exp[20,9(1 - d/D)^{1,05}],$$

где $\xi_{гр} = 0,182 Re^{-0,2}$;

– для $d/D = 0,9...0,98$ и $t/D = 0,25$

$$\frac{\xi}{\xi_{гр}} = \left[1 + \frac{\lg Re - 4,6}{6 \left(\frac{Re}{10^5} \right)^{0,33}} \right] (3d/D - 2)(2,5 - 1,5d/D) \exp[17(1 - d/D)^{0,858}],$$

Это значение получено при изотермическом течении и в условиях охлаждения газа $\xi_{гр}$ определяют как:

$$\xi_{гр} = 0,182 Re^{-0,2}.$$

Закрутка потока в трубах с помощью винтовых вставок. При закрутке потока местные пристеночные скорости увеличиваются, и общее течение изменяется. Закрутка потока в трубах осуществляется при использовании закрученных лент и шнеков (рис. 2). При этом оно поддерживается непрерывно по всей длине трубы, что обеспечивает постоянство соотношения тангенциальной и осевой составляющей скорости.

При закрутке потока лентой в поперечном сечении жидкость перетекает от периферии к центру в результате действия градиента давления. Кроме того, жидкость из пограничного слоя проникает в ядро потока. Эти движения приводят к возникновению четырех вихревых областей (рис. 3), которые способствуют усилению теплообмена и совместно с действием центробежных сил уменьшают толщину пограничного слоя. Вихревое смещение

также способствует возникновению турбулентного течения при меньших числах Re .

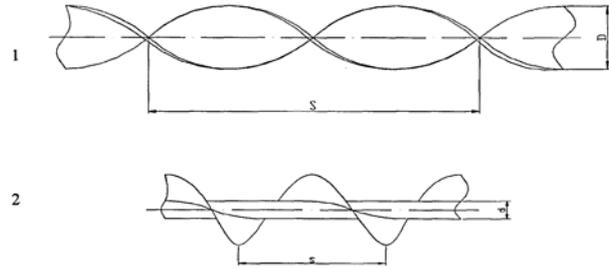


Рис. 2. Винтовые вставки: 1 – закрученная лента; 2 – шнек

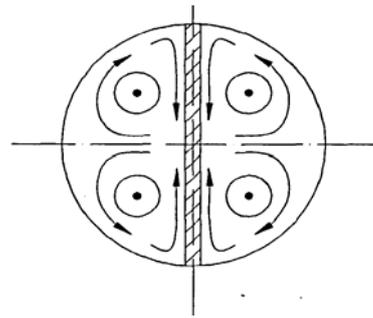


Рис. 3. Схема образования вторичных течений в трубе с закрученной лентой

Турбулентное течение теплоносителей в теплообменных аппаратах предпочтительнее, так как оно обеспечивает выгодное соотношение между уровнем теплообмена и величиной потерь давления по сравнению с ламинарным режимом.

Однако ламинарное и переходное течения также реализуются в каналах теплообменного оборудования как при нерасчетных режимах работы (пониженные расходы сред), так и при нормальных режимах эксплуатации. При ламинарных режимах течения определяющим механизмом переноса тепла является теплопроводность (поперек потока, по нормали к стенке), поэтому интенсивность теплоотдачи относительно мала. В отличие от турбулентного течения, в ламинарном (переходном) потоке термическое сопротивление в канале более равномерно распределено по всему его поперечному сечению, поэтому для интенсификации теплоотдачи необходимо возмущающее воздействие на обширную зону пристенного течения. Ленточные завихрители в этой области режимов особенно эффективны. Для ламинарного течения предпочтителен диапазон шагов закручивателя $S = (6...10)D$. Анализ, проведенный в различных работах, показывает, что увеличение теплоотдачи, полученное с помощью закручивателей, в переходном и турбулентном режимах с ростом числа Re значительно падает, и поэтому использовать закручиватели при больших числах Re для потока в трубе не рекомендуется.

Каналы со спиральными выступами и пружинными вставками. В трубах со спиральными выступами интенсификация обусловлена совместным действием двух факторов: турбулизацией и разрушением пристеночного слоя течения выступами и закруткой пристеночного потока под действием выступов. Интенсифицирующее воздействие частичной закрутки течения низким выступом

(только пристеночной зоны) реализуется через увеличение пристеночной скорости потока. Этот способ следует отнести к комбинированным способам интенсификации теплообмена, так как на поток одновременно действует турбулизация и закрутка.

Интенсификаторы типа «диффузор–конфузор».

Трубчатые поверхности теплообмена с волнистыми стенками состоят из участков конфузоров и диффузоров, которые изготавливаются путем накатки специальными роликами (рис. 4). Углы расширения диффузоров и конфузоров выбираются по условию получения потока с нестационарными отрывными явлениями. Такие отрывы потока интенсифицируют теплообмен.

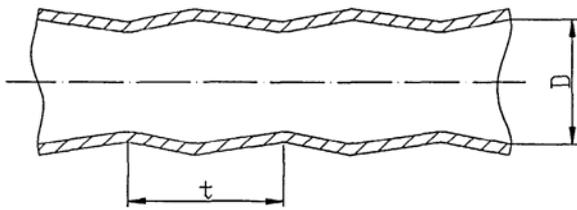


Рис. 4. Продольный разрез трубы типа конфузор–диффузор

При малой относительной длине диффузора и при наличии подпора за счет конфузора отрывы потока носят нестационарный характер, что благоприятно сказывается на интенсификации теплообмена. Внешняя турбулентность при отрицательном градиенте давления способствует интенсификации теплообмена. Указанные условия реализуются в рассматриваемом случае следующим образом: турбулентность генерируется в диффузорной области и благоприятно воздействует в конфузорной области.

Данные трубы характеризуются относительно низким сопротивлением и высоким теплообменом. Теплосъем при равном сопротивлении увеличивается приблизительно в 1,5 раза.

Трубы типа «конфузор–диффузор» перспективны для применения и в ламинарном, и в переходном режимах течения различных сред в трубах теплообменников. Эксперименты показывают, что при одинаковых с гладкой трубой энергозатратах на прокачивание масла в таких трубах при переходном режиме теплосъем увеличивается на 40...70 %.

Выбор оптимального метода интенсификации теплообмена определяется многими условиями, которые в каждом конкретном случае должны быть учтены. Приведем важнейшие из этих условий:

- цели и задачи интенсификации теплоотдачи в конкретном классе ТУ;
- величина допустимых энергетических затрат на интенсификацию теплообмена и вид располагаемой для этого энергии;
- гидродинамическая структура потока, в котором требуется интенсифицировать теплоотдачу; характер распределения плотности тепловых потоков или поле температур в теплоносителе; доступные способы управления структурой потока;
- технологичность изготовления ТУ с интенсификацией теплоотдачи, удобство и надежность в эксплуатации.

Задачи исследования. В задачи исследования входят:

- разработка методики исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления в трубах с различными интенсификаторами, создание соответствующих экспериментальных участков, разработка методики обработки экспериментальных данных;
- проведение экспериментов по исследованию теплоотдачи и гидравлического сопротивления внутри труб с турбулизаторами;
- анализ и обобщение опытных данных по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению в трубах с интенсификаторами.

Экспериментальная установка. Авторами разработана экспериментальная установка для исследования и изучения процессов интенсификации в теплообменном аппарате типа «труба в трубе» и методика проведения экспериментальных исследований.

Установка представляет собой разомкнутый контур, работающий на воздухе (рис. 5). Воздух из баллонной батареи через редуктор поступает в электрический подогреватель, состоящий из навитой на асбестовые ребра нихромовой проволоки, расположенных в электро- и термо- изолирующей асбестовой трубе. Эта труба в свою очередь находится в герметичной стальной трубе, во фланцах которой установлены механические фильтры, препятствующие попаданию нежелательных включений в измерительные станции и экспериментальный участок. Нагретый воздух, пройдя измерительную станцию, где происходит отбор параметров температуры и давления, поступает на экспериментальный участок, охлаждается водой, протекающей в кольцевом канале. Переход с режима на режим производится путем соответствующих расходов воздуха и воды.

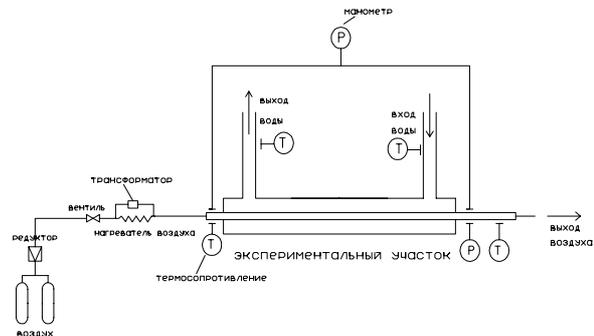


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

Для регулирования расхода воздуха предусмотрен вентиль. На выходе из экспериментального участка установлена диафрагма-расходомер, работающая при сверхкритическом перепаде давлений, что упрощает измерение расхода воздуха, позволяет определить давление и температуру воздуха перед диафрагмой, а не на ней. Затем охлажденный на экспериментальном участке воздух выбрасывается в атмосферу.

Экспериментальный участок состоит из сборно-разборного теплообменника типа «труба в трубе». Воздух подается через внутреннюю трубу, а в кольцевом зазоре протекает вода. В теплообменнике применяется схема «противоток», что дает возможность снимать с горячего теплоносителя больше теплоты.

Схема измерений. В процессе экспериментов измеряются температура газа на входе T_{g1} и на выходе T_{g2} теплообменника, расход газа G_g , температуры охлаждающей воды на входе T_{11} и на выходе T_{12} теплообменника, расход воды G_1 . Средний коэффициент теплоотдачи в трубе вычисляется по определенному в ходе эксперимента коэффициенту теплопередачи, известному коэффициенту теплоотдачи в кольцевом канале и известному тепловому сопротивлению стенки.

Для определения температуры воздуха на входе и выходе экспериментального участка, температуры воды используются термометры сопротивления ТП-198-0, а в качестве вторичного прибора – прецизионный преобразователь сигналов ТС и ТП «ТЕРКОН».

Методика обработки экспериментальных данных. Количество тепла, переданного на этом участке от воздуха к воде, рассчитывается по изменению температуры воздуха:

$$Q_g = G_g C p_g (T_{g1} - T_{g2}).$$

Для контроля теплового баланса количество переданного тепла определяется по изменению температуры воды:

$$Q_1 = G_1 C p_1 (T_{12} - T_{11}),$$

где $C p_g$ и $C p_1$ – средняя теплоемкость воздуха и воды соответственно. Утечками тепла вовне можно пренебречь, так как температура охлаждающей воды, протекающей снаружи, незначительно отличается от температуры окружающей среды.

Среднегаргарифический температурный напор между воздухом и водой (при противотоке)

$$\overline{\Delta T}_{\log} = \frac{(T_{g1} - T_{12}) - (T_{g2} - T_{11})}{\ln \frac{T_{g1} - T_{12}}{T_{g2} - T_{11}}}.$$

Средняя температура охлаждающей воды

$$\overline{T}_1 = \frac{T_{11} + T_{12}}{2}.$$

Средняя температура горячего газа

$$\overline{T}_g = \overline{T}_1 + \overline{\Delta T}_{\log} = \frac{T_{11} + T_{12}}{2} + \overline{\Delta T}_{\log}.$$

Коэффициент теплопередачи, отнесенный к внутренней поверхности трубы,

$$K = \frac{Q_g}{\pi D I \overline{\Delta T}_{\log}}.$$

Коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке

$$\alpha_g = \frac{1}{\frac{1}{K} - \frac{D}{2\lambda_{cm}} \ln \frac{D_n}{D} - \frac{D}{D_n \alpha_1}},$$

где D , D_n – внутренний и наружный диаметр трубы; λ_{cm} – коэффициент теплопроводности материала стенки.

Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде α_1 определяется по следующей формуле:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \lambda_1}{d_s},$$

где Nu_1 для трубы с канавками находят по соотношению

$$\frac{Nu_1}{Nu_{гп}} = 1 + 0,64 \left[1 - \exp \left(-35,8 \frac{h}{d_s} \right) \right] \left(1 - 0,274 \frac{t}{d_s} \right),$$

где $h = 0,5(D_n - d_n)$ – глубина канавок; $d_s = D - D_n$ – эквивалентный диаметр кольцевого канала; t – шаг канавок. Для гладкой трубы

$$Nu_{гп} = 0,017 Re_1^{0,8} Pr_1^{0,4} \left(\frac{Pr_1}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \left(\frac{D}{D_n} \right)^{0,18}.$$

Так как α_1 существенно выше α_g (отношение α_1/α_g порядка 50...100 и больше), то погрешности в определении α_1 несущественно влияют на точность определения среднего коэффициента теплоотдачи в трубе. Так, например, если погрешность определения α_1 составляет 20 %, погрешность измерения $K = 5$ %, отношение $\alpha_1/\alpha_g = 100$, то погрешность определения коэффициента теплоотдачи по горячей стороне $\delta\alpha_g = 5,3$ %. При $\alpha_1/\alpha_g = 50$ $\delta\alpha_g = 5,6$ %. Даже если $\delta\alpha_1$ вырастет на 50 %, то в первом случае $\delta\alpha_g = 5,6$ %, во втором $\delta\alpha_g = 6,2$ %, т. е. возрастает незначительно. Следовательно, данная методика обеспечивает достаточно высокую точность определения среднего коэффициента теплоотдачи в трубе в случае интенсификации теплообмена, когда коэффициент теплоотдачи в кольцевом канале вычисляется с меньшей точностью, чем в гладком канале.

Следует отметить, что данная методика исключает измерение температуры стенки, что позволяет значительно упростить конструкцию экспериментальных участков. Это особенно важно для исследования интенсификации теплообмена, когда приходится исследовать большое число вариантов турбулизаторов. Кроме того, повышается и надежность самих данных, так как проблема достоверного измерения температуры стенки трубы с турбулизаторами является весьма трудной.

По предварительным исследованиям сопоставляются эффективность использования различных методов интенсификации теплообмена (рис. 6).

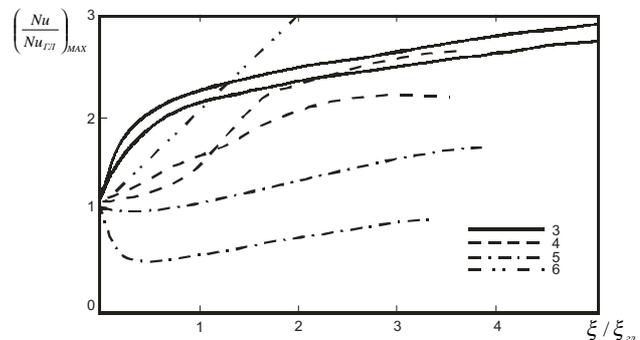


Рис. 6. Максимальное увеличение теплоотдачи $\left(\frac{Nu}{Nu_{гп}} \right)_{MAX}$ при допустимом увеличении гидравлического сопротивления $\xi/\xi_{гп}$ при $Re = 10^4$

При $Re = 10^4$ закрученная лента (рис. 7) показывает результат $\alpha/\alpha_{гп} = 2,34...1,8$ и $(\xi/\xi_{гп}) = 4,05...2,5$, что позволяет уменьшать объем аппарата на 0,53...0,64. С ростом Re эффективность ленточных вставок существенно падает: для $Re = 10^5$ получено $\alpha/\alpha_{гп} = 1,88...1,49$ и $(\xi/\xi_{гп}) = 5,55...1,65$, что уменьшает объем на 0,822...0,7. Следует отметить, что ни при каких значениях чисел Re и шагах закрутки ленты не удалось получить $\alpha/\alpha_{гп} > \xi/\xi_{гп}$, т. е. опережающего увеличения коэффициента теплоотдачи по сравнению с ростом гидравлического сопротивления.

Эффективность шнековых вставок значительно ниже ленточных. Для шагов закрутки $S/D = 4...12$ получается $\alpha/\alpha_{гп} = 1,75...1,16$ и $(\xi/\xi_{гп}) = 4,74...2,64$ при $Re = 10^4$ и

$\alpha / \alpha_{ст} = 0,88 \dots 0,58$ и $(\xi / \xi_{ст}) = 3,40 \dots 1,38$ при $Re = 10^5$. При этом для $Re = 10^4$ $V / V_{ст} = 0,84 \dots 1,19$, а для $Re = 10^5 = 1,90 \dots 2,67$.

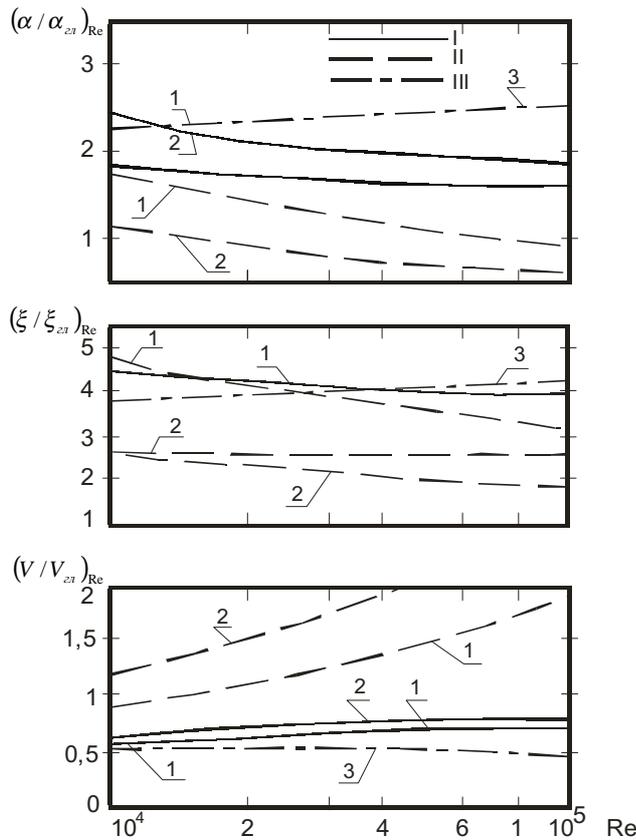


Рис. 7. Влияние числа Re на увеличение коэффициентов теплообмена $(\alpha / \alpha_{ст})_{Re}$, гидравлического сопротивления $(\xi / \xi_{ст})_{Re}$ и на отношение объемов теплообменных аппаратов $V / V_{ст}$: I – закрутка потока винтовой лентой; II – закрутка потока шнеком; III – кольцевые диафрагмы; 1 – $S / D = 4$; 2 – 10; 3 – кольцевые диафрагмы с $d / D = 0,94$ и $t / D = 0,25$

Таким образом, незначительное повышение эффективности ($V / V_{ст} < 1$) можно получить при $S / D = 4$ и $Re = 10^4$. С ростом Re и S / D величина $V / V_{ст} > 1$, т. е. применение шнековых вставок дает отрицательный результат, поскольку ухудшает параметры теплообменных аппаратов.

Использование кольцевых турбулизаторов позволяет в характерном для теплообменных аппаратов диапазоне изменения чисел $Re = 10^4 - 10^5$ обеспечить стабильное увеличение теплоотдачи в 2,3...2,43 раза при росте гидравлического сопротивления в 3,8...4,15 раза, что дает возможность получить $V / V_{ст} = 0,52 \dots 0,50$ или уменьшить объем в 1,95...2,00 раза. Опережающий рост теплоотдачи в таких трубах достигается при значениях $d / D = 0,97 \dots 0,98$, при этом $V / V_{ст} = 0,5 \dots 0,6$.

Другие методы закрутки (спиральные каналы, закрутка потока на входе в канал, спиральные проволоочные вставки, спиральные или продольные ребра внутри труб) менее эффективны, чем рассмотренные выше. Также менее эффективны такие методы, как организация пульсаций потока с помощью установленных на входе специальных пульсаторов и использование шероховатых поверхностей.

Библиографический список

1. Кузма-Китча, Ю. А. Методы интенсификации теплообмена: учеб. пособ. по курсу «Методы интенсификации теплообмена» / Ю. А. Кузма-Китча. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 112 с.
2. Щербаченко, И. К. Исследование интенсификации теплообмена в трубах с кольцевыми турбулизаторами плавной конфигурации / И. К. Щербаченко. М.: Изд-во МЭИ, 2003. С. 151–154.
3. Дрейцер, Г. А. Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами / Г. А. Дрейцер, С. А. Исаев, И. Е. Лобанов // Труды МАИ / МАИ. М., 2003.

A. A. Kishkin, M. V. Kraev, A. A. Zuev

INTENSIFICATION OF HEAT EXCHANGE

Review was conducted difference intensification methods of the convective heat transfer. The experimental equipment and investigation method were developed. Preliminary investigation results of heat exchange methods efficiency were displayed.

А. О. Кузнецова

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ РАСКРЫВАЮЩИХСЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ

Рассмотрена математическая модель раскрывающейся механической системы крыла панелей солнечных батарей и проведено полное исследование параметров системы, которые проверяются на этапе экспериментальной отработки, и параметров системы, проверить которые на этапе экспериментальной отработки не представляется возможным.

В связи с повышением требований к конструкциям механических систем космических аппаратов в последнее время значительно усложнились как сами конструкции раскрывающихся механических систем, так и геометрия их элементов. Вопрос снижения веса, а значит, и стоимости таких систем в связи с их эксплуатацией в космических условиях стоит особенно остро.

Расчет параметров раскрытия и динамических нагрузок элементов конструкций в этих случаях требует повышенного внимания из-за того, что их экспериментальная отработка затруднена.

Максимальные уровни нагрузок, действующих на элементы подобных систем, определяются интенсивностью динамического процесса, имеющего место при их эксплуатации. Прежде всего, это случай мгновенного изменения характера связей, наложенных на раскрываемые тела системы.

Теоретическая механика предлагает разнообразные методы для решения задач динамики многосвязных механизмов. В простейших случаях уравнения движения механизмов можно легко написать в явной форме. Однако необходимость создания алгоритмов, которые позволяют определить движение все более сложных систем, обладающих произвольной топологией, выдвигает повышенные требования к математическим моделям, описывающим поведение таких объектов.

Уравнения движения следует представить в наиболее общем виде, как, например, в программном комплексе ADAMS,

в основу которого для описания уравнений движения системы тел заложены уравнения Эйлера–Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial q} \right)^T \cdot \lambda = F \quad (1)$$

совместно с уравнениями связей, записанных в форме алгебраических соотношений

$$\Phi(q, t) = 0, \quad (2)$$

где T – суммарная кинетическая энергия; Φ – вектор связей, F – вектор обобщенных приложенных сил; λ – вектор множителей Лагранжа (силы реакции в связях); t – независимая переменная времени; q – вектор обобщенных координат.

Дифференцирование уравнений системы (1) сводится к уравнениям первого порядка, численное интегрирование которых позволяет описывать движение самых различных механических систем.

Моделирование поведения конструкции на орбите возможно только в рамках полномасштабной математической модели, учитывающей эффекты различного порядка и особенности движения каждой подвижной части развертываемой конструкции.

Основу математической модели, приведенной в данном исследовании, составляет динамика раскрытия сложной механической системы крыла панелей солнечных батарей (рис. 1).

Панели солнечных батарей представлены твердыми телами, соединенными между собой шарнирными узла-

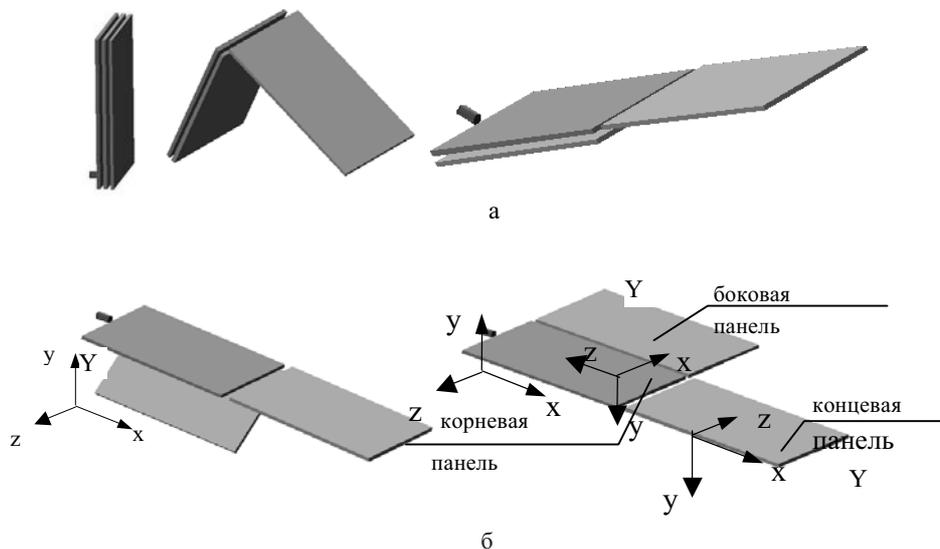


Рис. 1. Этапы раскрытия крыла: а – крыло в сложенном положении и раскрытие концевой и корневой панелей, б – раскрытие боковой панели и крыло в рабочем положении

ми с пружинными приводами во время раскрытия и упругими закреплениями после зачековки, которые моделируют упругость панелей.

В сложенном положении крыло солнечных батарей удерживается вдоль корпуса с помощью узлов фиксации. Раскрытие крыла из сложенного положения в рабочее осуществляется следующим образом:

- поворотом корневой панели на $93,5^\circ$ относительно оси вращения, параллельной оси Z главной системы координат;
- поворотом концевой панели на 180° относительно оси вращения, параллельной оси Z главной системы координат;
- поворотом боковой панели на 180° относительно оси вращения, параллельной продольной оси корневой панели.

Движущие моменты в шарнирных узлах с учетом моментов сопротивления в нормальных условиях изменяются по законам, представленным на графиках (рис. 2).

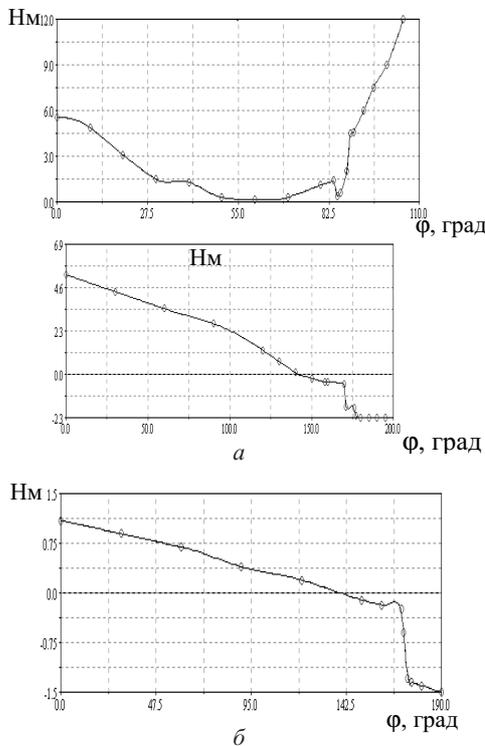


Рис. 2. Движущие моменты в шарнирных узлах:
а – в корневом и концевом шарнирных узлах
б – в боковом шарнирном узле

Упругие закрепления в каждом шарнирном узле после зачековки представлены в виде функций упругого момента с учетом демпфирования

$$M = \begin{cases} k \cdot (\varphi - \varphi_0) - c \cdot \dot{\varphi} & \text{для } \varphi - \varphi_0 > 0 \\ 0 & \text{для } \varphi = \varphi_0 \\ -k \cdot (\varphi - \varphi_0) + c \cdot \dot{\varphi} & \text{для } \varphi - \varphi_0 < 0 \end{cases},$$

где k – коэффициент упругости; φ – текущий угол раскрытия; φ_0 – конечный угол раскрытия; c – коэффициент демпфирования; $\dot{\varphi}$ – скорость раскрытия.

После создания полномасштабной математической модели сложной механической системы, учитывающей особенностей движения каждой подвижной части раз-

вертываемой конструкции, проводится исследование различных параметров системы.

При анализе динамики раскрытия и последовательности зачековки панелей (рис. 3) мы видим, что сначала при достижении угла $\varphi = 180^\circ$ в момент времени $t = 2,3$ с зачековывается концевая панель, затем при достижении угла $\varphi = 93,5^\circ$ в момент времени $t = 4,8$ с зачековывается корневая панель и последней при достижении угла $\varphi = 180^\circ$ в момент времени $t = 6,4$ с зачековывается боковая панель.

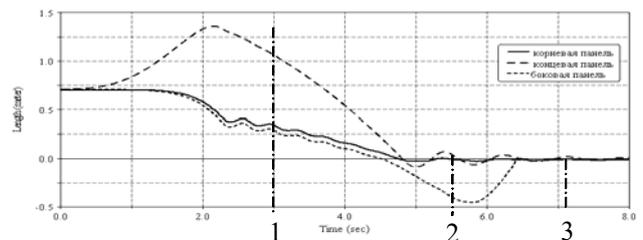


Рис. 3. Углы раскрытия панелей: 1 – зачековка концевой панели; 2 – зачековка корневой панели; 3 – зачековка боковой панели

При изучении движения панелей во время раскрытия рассматривается движение центра масс каждой панели в глобальной системе координат (см. рис. 1). Изменения составляющих координат векторов центров масс панелей (рис. 4) обусловлены приведенной выше последовательностью их зачековок.

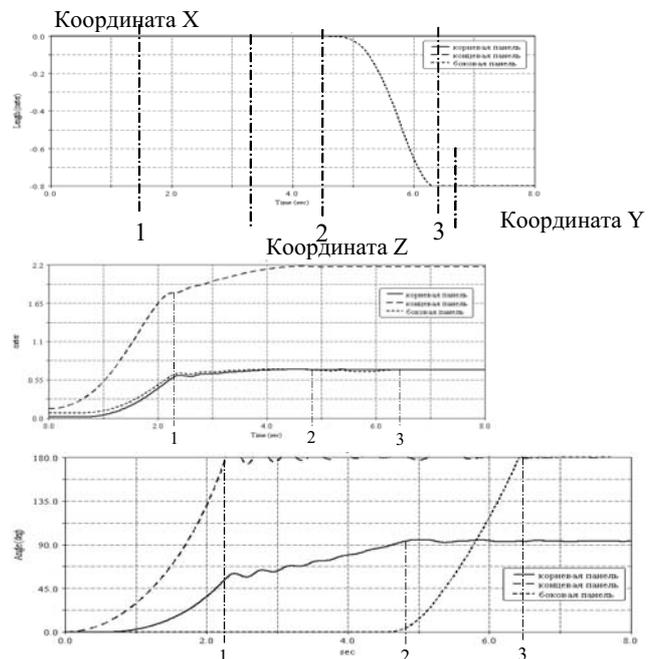


Рис. 4. Координаты траектории движения центра масс корневой, концевой и боковой панелей

По приведенным графикам прослеживается логика и направления раскрытия панелей:

- на первом этапе во время раскрытия одновременно концевой и корневой панелей концевая панель поворачивается относительно оси Z и встает в одну плоскость с корневой панелью, поэтому происходит резкое возрастание координат X и Y концевой панели. В то же время координата Y концевой и боковой панелей мед-

ленно уменьшается, а их координата X также медленно возрастает;

– после зачековки концевой панели во время $t = 2,3$ с координата Y корневой и боковой панелей продолжает медленно уменьшаться и наблюдаются их незначительные колебания. Координата Y концевой панели уменьшается резко, и к моменту зачековки корневой панели, т. е. после полного их раскрытия, концевая и корневая панели находятся в плоскости XZ вдоль оси X ;

– на последнем этапе раскрытия после зачековки корневой панели во время $t = 4,8$ с происходят более значительные колебания концевой панели относительно ее рабочего положения. В то же время раскрывается боковая панель относительно глобальной оси X , см. графики координат Y и Z центра масс боковой панели по рис. 4;

– после полного раскрытия всех панелей ($t = 6,4$ с) их центры масс имеют нулевую координату Y , так как все они находятся в одной плоскости XZ .

Полученное аналитическое решение требует подтверждения достаточности результатов в лабораторных условиях. Для этого все развертываемые устройства проходят наземные испытания.

При проведении наземных испытаний проверяется работоспособность всех развертываемых систем. Главным требованием к испытательным стендам для отработки развертываемых конструкций является обеспечение условий имитации невесомости с допустимой погрешностью, поскольку на Земле невозможно создать такие идеальные условия, когда влияние гравитации и воздуха было бы полностью исключено.

Без достаточно точного прогноза динамического поведения таких систем на орбите довольно трудно подготовить и настроить испытательное оборудование для проведения их экспериментальной отработки в наземных условиях в основном из-за необходимости имитировать невесомость для каждой подвижной части развертываемой конструкции при помощи системы обезвешивания.

Для системы раскрытия панелей при экспериментальной отработке возможно поэтапное подтверждение таких параметров раскрываемой системы, как движущие моменты, моменты сопротивления во всех шарнирных узлах, углы и время раскрытия каждой панели.

Сначала подготавливается система обезвешивания для раскрытия концевой и корневой панелей со сложной боковой панелью. Затем, после проверки всех параметров системы этого этапа производится подготовка системы обезвешивания для проверки параметров системы при раскрытии боковой панели с уже раскрытыми и зачекованными концевой и корневой панелями.

Таким образом, верификация модели на соответствие полученных на ее основе результатов позволяет проводить дальнейшее исследование таких параметров, как угловые скорости панелей и нагрузки в шарнирных узлах. Анализируя графики угловых скоростей, можно более наглядно проследить все колебательные процессы после зачековки каждой из панелей. Графики (рис. 5) показывают, что поскольку угол раскрытия концевой панели противоположен углу раскрытия корневой панели, зачековка концевой панели уменьшает скорость раскрытия корневой панели и значительно увеличивает время ее рас-

крытия. Поэтому при проектировании и особенно при экспериментальной отработке необходим особый контроль за моментом сопротивления в шарнирном узле корневой панели на этом этапе раскрытия для обеспечения полного раскрытия крыла панелей солнечных батарей.

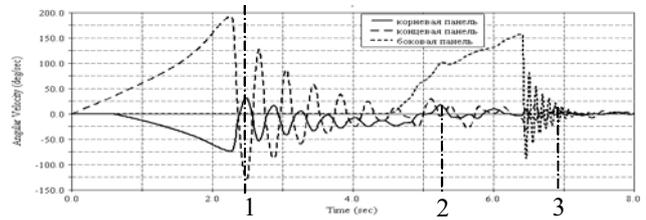
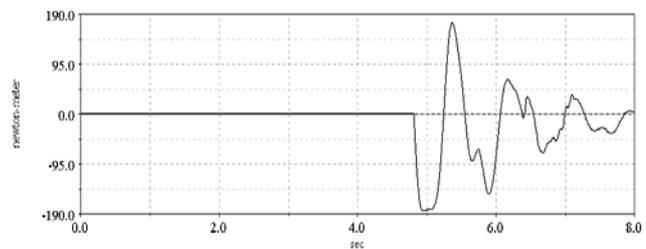
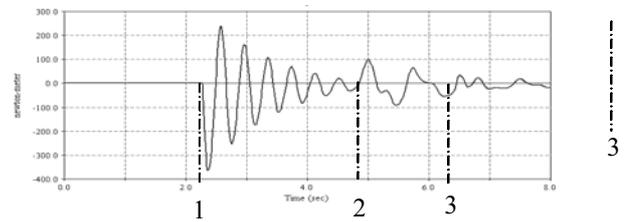


Рис. 5. Угловые скорости раскрытия корневой, концевой и боковой панелей

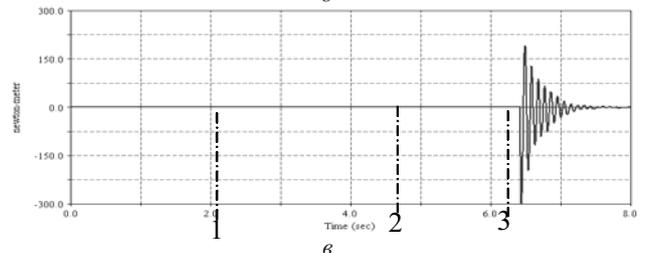
Последовательность зачековок панелей (рис. 6) прослеживается наиболее четко, так как до момента зачековки самой панели нагрузки в соответствующем ей шарнирном узле отсутствуют.



а



б



в

Рис. 6. Нагрузки в шарнирных узлах панелей: а – нагрузки в шарнирном узле корневой панели; б – нагрузки в шарнирном узле концевой панели; в – нагрузки в шарнирном узле боковой панели

По нагрузкам в шарнирных узлах можно оценить частоту колебаний как самих панелей, так и всего крыла в целом в раскрытом положении после $t = 6,4$ с (рис. 6, а). Особенно наглядно прослеживается влияние зачековок корневой и боковой панелей на колебания концевой панели (рис. 6, б, в).

Таким образом, при анализе динамики раскрытия сложной механической системы крыла панелей солнечных батарей проводилось исследование и оптимизация параметров системы при различных входных па-

раметрах. В рамках полномасштабной математической модели определялись входные параметры, при которых система сохраняет свою работоспособность. Такое исследование позволяет полностью проанализировать как раскрытие механической системы, т. е. прове-

сти полное исследование как параметров, которые проверяются на этапе экспериментальной отработки, так и параметров системы, проверить которые на этапе экспериментальной отработки не предоставляется возможным.

A. O. Kuznetsova

RESEARCH OF THE DYNAMICS OF THE MOTION OF UNCOVERED MECHANICAL SYSTEMS WITH ELASTIC TIES

Is considered the mathematical model of the uncovered mechanical system of wing of the panels of pateries solar and carried out the complete study of the parameters of system which are verified at stage of the experimental processing and the parameters of system, to verify which at stage of the experimental processing is not provided possible.

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ НИКЕЛЬ-ВОДОРОДНОГО АККУМУЛЯТОРА

Предложена аналитическая модель теплофизических процессов в никель-водородном аккумуляторе. Построены структурная и эквивалентная электрическая схемы. Приведены результаты апробации модели на известных задачах нестационарной теплопроводности.

Прогресс космической техники требует постоянного совершенствования систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) по таким параметрам, как срок службы, КПД, массоэнергетические характеристики. Используемые в составе СЭП большинства КА батареи на основе никель-водородных аккумуляторов (НВА) имеют лучшие суммарные показатели по этим критериям, накоплен большой опыт по работе с ними. Тем не менее, перед разработчиками встают задачи оптимизации режимов работы, оценки влияния на качество работы конструктивных и химических параметров, исследования ресурсного спада характеристик и многие другие. Такие задачи достаточно сложны, поэтому их удобно решать с использованием математических моделей. Модель электрохимической ячейки может быть использована для определения лимитирующих процессов и связей, прогнозирования поведения аккумулятора и батареи, для целей оптимизации.

Одна из важнейших задач при исследованиях НВА – создание модели тепловых процессов. Параметры электрохимических реакций, ресурсная деградация существенно и нелинейно зависят от распределения температуры T по объему электродного блока. Знание этих зависимостей и даже их приближенные оценки позволят корректировать конструкцию и теплофизические параметры электрохимической ячейки и аккумуляторной батареи в целом для достижения оптимума характеристик.

Для построения теплофизической модели НВА принята расчетная схема электродного блока в виде неограниченного цилиндра, внутри которого происходит выделение тепла за счет химических процессов, протекающих при заряде или разряде аккумулятора. Между стенкой корпуса НВА и цилиндром имеется газовый зазор δ . С внешней стороны корпус охлаждается жидкостным охлаждением [1].

Процесс охлаждения в этом случае можно описать в виде дифференциального уравнения в цилиндрической системе координат с граничными условиями:

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) + \frac{\omega}{c \cdot \gamma},$$

где $T(r,t)$ – температура электродного блока; a – коэффициент температуропроводности электродного блока; ω – мощность тепловыделения в электродном блоке; c – теплоемкость электродного блока; γ – его плотность.

Приняты следующие граничные условия:

– в центре цилиндра в силу симметрии $\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = 0$ для $r = 0$.

– на границе электродного блока имеет место граничное условие 3-го рода:

$$-\lambda_{\text{Э}} \cdot \left(\frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = -\frac{\lambda_{\text{H}_2}}{\delta} \cdot (T(r,t) - T_c) \text{ при } r = R,$$

где T_c – температура стенки корпуса аккумулятора; $\lambda_{\text{Э}}$ и λ_{H_2} – теплопроводность электродов и водорода.

Начальное условие $T(r, \tau) = T_0$ при $t = 0$ отражает равномерное начальное распределение температуры внутри электродного блока.

Решение уравнения имеет вид [2; 5]

$$T(r, \tau) = T_0 + (T_c - T_0) \left[1 + \frac{1}{4} Po \left(1 + \frac{2}{Bi} - \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=0}^{\infty} \left(1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) A_n J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) e^{-\mu_n^2 Fo} \right],$$

где μ_n – корни уравнения $\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{1}{Bi} \cdot \mu$; $Po = \frac{\omega R^2}{\lambda(T_c - T_0)}$ – критерий Померанцева; $Bi = HR$ – критерий Био; $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$ – число Фурье.

Полученное решение справедливо при условии, что мощность тепловыделения ω распределена равномерно по объему электродного блока и постоянна для любого момента времени. Это редко наблюдается на практике, поскольку на ω оказывают влияние следующие факторы:

– нелинейная зависимость мощности внутреннего тепловыделения от текущей емкости, температуры и тока НВА;

– зарядно-разрядные устройства по сути регулируют отбор мощности от НВА. Нелинейно зависящее от C , T , I напряжение аккумулятора также меняет ток и, следовательно, мощность.

Решение получено лишь для одного частного случая, что не позволяет решать задачи управления НВА как некоторым объектом, имитировать реальные процессы при работе НВА; можно лишь косвенно анализировать и оптимизировать включающие НВА системы.

Величину тепловыделения представим в виде некоторой функции $\omega = \omega(t)$. Решая исходную задачу методом преобразования Лапласа, получим

$$T(r, s) = \frac{H \cdot J_0 \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right)}{s \cdot \left(J_1 \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} - H \cdot J_0 \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) \right)} \left(\frac{\omega}{c\gamma} + T_0 - T_c \right) + \left| \frac{\omega}{s \cdot c\gamma} + \frac{T_0}{s} \right|$$

Здесь можно выделить ядро с трансцендентной передаточной функцией (ПФ):

$$K(r, s) = - \frac{H \cdot J_0 \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right)}{s \cdot \left(J_1 \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} - H \cdot J_0 \left(\sqrt{\frac{s}{a}} R \right) \right)},$$

где параметры начального и граничного условий, уровень мощности тепловыделения сразу выделены как множители ядра. Решение можно записать в виде

$$T(r, s) = K(r, s) \cdot (T_0 - T_c) + K(r, s) \cdot \frac{\omega(s)}{c\gamma} + \frac{\omega(s)}{c\gamma} \cdot \frac{1}{s} + \frac{T_0}{s}$$

Полученный результат показывает, что структура решения $T(r, s)$ не зависит от вида управляющего воздействия $\omega(t)$, изображение которого формально записано как некоторая функция $\omega(s)$. Из этого следует, что в нашей задаче можно получить точное аналитическое решение для любой интересующей функции $\omega(t)$, для чего вместо $\omega(s)$ нужно подставить ее изображение и определить $T(r, s)$ способом обратного преобразования.

Аппроксимируя $K(r, s)$ по теоремам разложения [2], запишем ПФ в виде

$$K(r, s) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n(r)}{s - s_n} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n^*(r)}{T_n s + 1}$$

где $s_n = -\frac{a \cdot \mu_n^2}{R^2}$. Умножим и разделим ПФ на оператор Лапласа s , тогда решение будет иметь вид

$$T(r, s) = sK(r, s) \left(\frac{\omega}{s \cdot c\gamma} + \frac{T_0}{s} - \frac{T_c}{s} \right) + \frac{\omega}{s \cdot c\gamma} + \frac{T_0}{s} = \left(\frac{\omega}{s \cdot c\gamma} + \frac{T_0}{s} - \frac{T_c}{s} \right) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{s \cdot C_n^*(r)}{T_n s + 1} + \frac{\omega}{s \cdot c\gamma} + \frac{T_0}{s}$$

Обозначим ПФ электродного блока выражением

$$W(r, s) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{s \cdot K_n(r)}{T_n s + 1}$$

которое эквивалентно ее представлению в виде бесконечной суммы аperiодических звеньев первого порядка. Ограничивая число членов разложения, решение можно представить в виде структурной схемы. Подставляя значение r , получим график изменения температуры на данном радиусе (рис. 1).

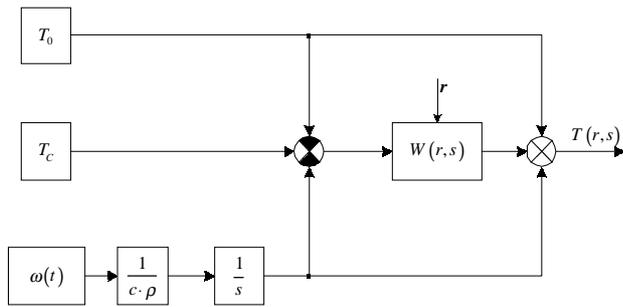


Рис. 1. Структурная схема задачи

По структурной схеме легко построить эквивалентную электрическую схему процесса теплопередачи методами теории электрических цепей, ограничивая число аperiодических звеньев ПФ. Эквивалентная электрическая схема (рис. 2) была построена и промоделирована в пакете Spectrum MicroCap 7.1. Номиналы элементов схемы однозначно связаны с теплофизическими параметрами объекта. Сопротивления R выбираются из условия работоспособности и точности схемы.

Моделирование системы показало адекватность расчетных и экспериментальных данных [6]. Результаты моделирования для разных моментов времени представлены на графике (рис. 3).

Для расчетов использовались тепловые и конструктивные параметры аккумулятора НВ-100 [3]. Температура стенки аккумулятора T_c , равная температуре охлаждающей жидкости контура, и начальная температура аккумулятора T_0 принимались равными 20°C .

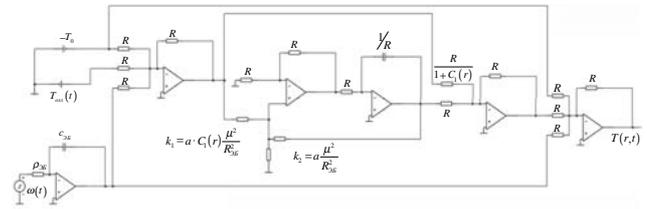


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема процессов теплопередачи аккумулятора

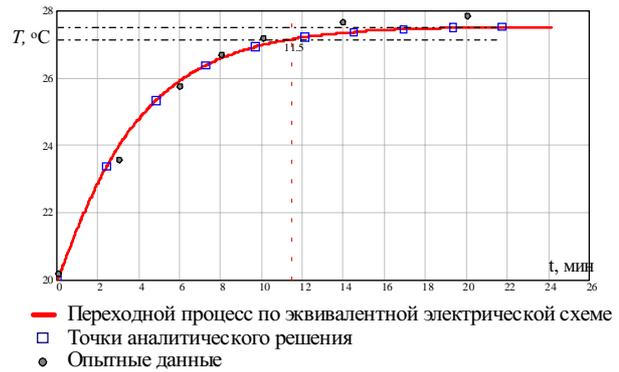


Рис. 3. Графики решения для разных моментов времени

Максимальная температура, равная $27,5^\circ\text{C}$, наблюдается в центре электродного блока (см. рис. 3). Время выхода в установившийся режим составляет 11,5 мин. Перепад температур на газовом промежутке – 57 % от общего перепада температур.

Построенная эквивалентная электрическая схема была проверена на примерах с другим типом входных воздействий. В качестве тестовых примеров взяты известные краевые задачи распределенной нестационарной теплопроводности [2; 5].

Далее приведем результаты моделирования полученной системы в сравнении с известными решениями для $r = 0$. Результаты численного моделирования схемы получены в пакете Spectrum MicroCap 7.1, расчет точек аналитического решения и сравнение сделаны в пакете MATLAB 6.5. Для большей наглядности графики решений построены для обобщенного времени $Fo = \frac{a}{R^2} t$. Параметры входных воздействий следующие: $T_0 = 0^\circ\text{C}$, $T_c = 5^\circ\text{C}$, $\omega_0 = 20000 \frac{\text{Bm}}{\text{M}^3}$, $k = 0.005 \text{сек}^{-1}$, $b = 1^\circ\text{C}/\text{сек}$.

1. Задача на нагревание с управлением по граничным условиям [2. С. 238]. Задано начальное постоянное распределение температуры цилиндра T_0 . В начальный момент времени он помещается в среду с температурой T_c . Теплообмен с окружающей средой происходит по закону Ньютона (граничное условие третьего рода) (рис. 5).

2. Задача на нагревание с управлением по внутреннему тепловыделению [2. С. 340]. Задано начальное постоянное распределение температуры цилиндра T_0 . Температура внешней среды $T_c = T_0$. Внутри цилиндра действует источник тепла с удельной мощностью $\omega(\tau) = \omega_0$. Теплообмен с окружающей средой происхо-

дит по закону Ньютона (граничное условие третьего рода) (рис. 6).

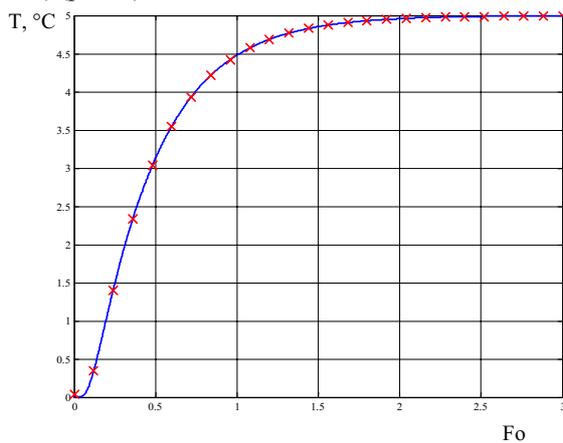


Рис. 5. Результаты моделирования задачи на нагревание: — результаты моделирования; × – точки точного аналитического решения

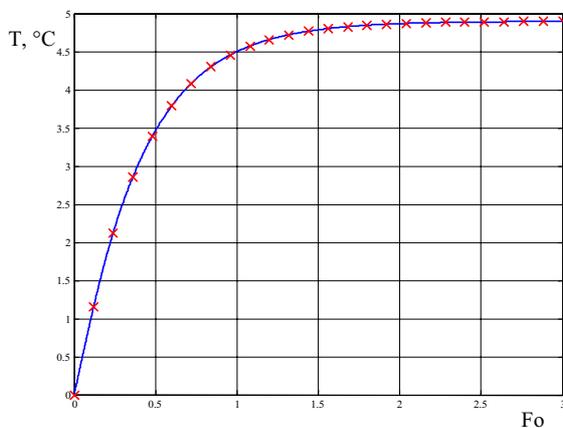


Рис. 6. Результаты моделирования задачи на нагревание постоянным внутренним тепловыделением

3. *Задача на нагревание с управлением по внутреннему тепловыделению* [2. С. 340]. Задано начальное постоянное распределение температуры цилиндра T_0 . Температура внешней среды $T_c = T_0$. Внутри цилиндра действует источник тепла с удельной мощностью $\omega(\tau) = \omega_0 \cdot e^{-k\tau}$. Теплообмен с окружающей средой происходит по закону Ньютона (граничное условие третьего рода) (рис. 7).

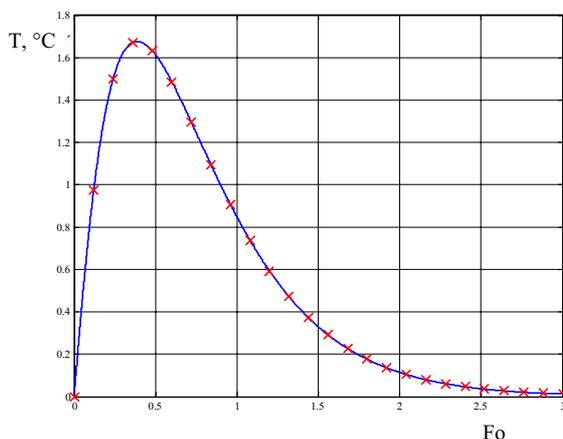


Рис. 7. Результаты моделирования задачи на нагревание экспоненциальным внутренним тепловыделением

4. *Задача на нагревание с управлением по граничным условиям* [2. С. 284]. Задано начальное постоянное распределение температуры цилиндра T_0 . Температура внешней среды $T_c = T_0 + bt$. Теплообмен с окружающей средой происходит по закону Ньютона (граничное условие третьего рода) (рис. 8).

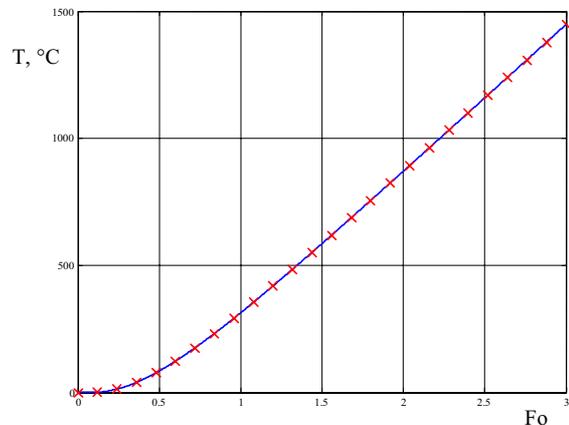


Рис. 8. Результаты моделирования задачи на нагревание линейно повышающейся температурой внешней среды

Сравнение результатов показывает правомерность использования полученной модели в форме эквивалентной электрической схемы для моделирования распределенных тепловых процессов.

Таким образом, разработана структурная схема и передаточная функция процессов теплопередачи никель-водородного аккумулятора.

Структурная модель позволяет получить точные аналитические выражения отклика температурного поля электродного блока НВА на любое аналитически описываемое входное воздействие. Адекватность модели подтверждена на серии тестовых задач теории нестационарной теплопроводности.

Модель в виде эквивалентной электрической схемы позволяет проводить моделирование при входных воздействиях любого вида. Адекватность моделей подтверждается опытными данными.

Получены временные оценки теплофизических процессов никель-водородного аккумулятора.

Существует прямая зависимость параметров моделей от параметров моделируемого объекта с распределенными параметрами, что позволяет проводить анализ их влияния на поведение и свойства объекта.

Библиографический список

1. Лелеков, А. Т. Моделирование теплофизических характеристик никель-водородного аккумулятора / А. Т. Лелеков // Решетневские чтения: тез. докл. VII Всерос. науч. конф. / СибГАУ. Красноярск, 2003.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Высш. шк., 1967.
3. Металл-водородные электрохимические системы. Теория и практика / Б. И. Ценер и др. Л.: Химия, 1983.
4. Химические источники тока / А. Н. Морозов, В. С. Кудряшов, М. В. Лукьяненко и др. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984.

5. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких / Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1976.

6. Пядишнос, А. А. Исследования в области электрических аккумуляторов / А. А. Пядишнос, Б. И. Центр,

В. С. Панков и др. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988.

7. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: учеб. пособие. / под ред. Э. Я. Раппопорт. М.: Высш. шк., 2003.

A. T. Lelekov

THERMAL MODEL OF THE NI-H₂ STORAGE CELL

The dynamic analytical thermophysical model of Ni-H₂ storage cell is proposed. The structural scheme model and equivalent electric circuit are constructed. The results model approving on known non-stationary heat conductivity problems are given.

ОПТИМИЗАЦИЯ НАБОРА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Проведена оптимизация выбора перечня параметров диагностирования авиационной техники, базирующаяся на анализе таблиц состояний.

Совокупность диагностических параметров, за исключением информационного, приводит, как правило, к большому числу избыточной диагностической информации и усложнению системы диагностирования. Поэтому следует произвести оптимизацию выбора перечня диагностических параметров. Выбор метода оптимизации зависит от конкретной ситуации применения средств диагностирования.

Наиболее часто используют метод, базирующийся на анализе таблиц состояний, в которых столбцы соответствуют всем возможным состояниям, а строки – всем возможным диагностическим параметрам, характеризующим эти состояния. Если параметр отражает состояние, то в соответствующей клетке ставится единица, а если нет, то ноль.

Предполагается, что все состояния равновероятны ($P(S_i) = 1/n$), а неопределенность состояния системы S характеризуется энтропией H :

$$H(S) = -\sum_{i=1}^n P(S_i) \cdot \log_2 P(S_i) = \log_2 n,$$

где n – количество возможных состояний.

Проверка каждого параметра y_j несет определенную информацию о состоянии объекта:

$$I_1(y_j) = H(S) - H_i(S_i/y_j). \quad (1)$$

Значение $H_i(S_i/y_j)$ определяется как математическое ожидание энтропий подсистем, в одну из которых входит m состояний, выявляющихся параметром y_j , т. е. тех, у которых результат проверки составляет $R = 1$, а в другую – состояний, не выявляющихся параметром y_j , т. е. $R = 0$

$$H(S/y_j) = P_1(y_j/R=1) \cdot H_{R=1}(S) + P_2(y_j/R=0) \cdot H_{R=0}(S), \quad (2)$$

где $P_1(y_j/R=1) = \frac{m}{n}$ – вероятность выявления состояний параметром y_j ; m – число выявляющихся состояний; $P_2(y_j/R=0) = \frac{\ell}{n}$ – вероятность невыявления состояний параметром y_j ; ℓ – число невыявляющихся состояний; n – число возможных состояний; $H_{R=0}(S) = \log_2 \ell$ – энтропия подсистемы состояний, не выявляемых проверкой y_j ; $H_{R=1}(S) = \log_2 m$ – энтропия подсистемы состояний, выявляемых проверкой y_j .

Подставим полученные значения в исходное уравнение:

$$H(S/y_j) = \frac{m}{n} \log_2 m + \frac{\ell}{n} \log_2 \ell. \quad (3)$$

Информация о состоянии системы, полученная в результате обследования параметра y_j , записывается формулой

$$I(y_j) = \log_2 n - \left(\frac{m}{n} \log_2 m + \frac{\ell}{n} \log_2 \ell \right) = \left(\frac{m}{n} \log_2 \frac{n}{m} + \frac{\ell}{n} \log_2 \frac{n}{\ell} \right). \quad (4)$$

Результаты вычислений – это информация о состоянии системы. Выбираем наибольшие значения. Один из этих параметров (любой) включаем в оптимальный набор диагностических параметров.

Далее первую таблицу перестраиваем так, чтобы в одной группе были объединены состояния, которые определяются выбранным из первой таблицы параметром (состояния, которые дают $R = 1$, а в другой – остальные состояния $R = 0$).

Для вычисления информации каждого параметра используется выражение

$$I_2(y_j) = -\sum \frac{m+\ell}{n} \left(\frac{m}{m+\ell} \log_2 \frac{m}{m+\ell} + \frac{\ell}{m+\ell} \log_2 \frac{\ell}{m+\ell} \right). \quad (5)$$

Результаты расчетов заносим в последний столбец второй таблицы. Определяем наибольшую информативность по максимальным значениям.

Одну группу второй таблицы разделим на две подгруппы, в результате получим третью таблицу. Для вычисления информации каждого параметра используем выражение (5). Результаты расчетов заносим в последний столбец третьей таблицы.

По анализу третьей таблицы увидим, что три параметра будут иметь одинаковую информативность при условии, что ранее в оптимальный набор был включен параметр, взятый нами из первой таблицы, y_2 . Включим в оптимальный набор, наряду с параметром y_2 , и параметр y_1 и определим следующий параметр, который необходимо взять. Для этой цели вторую таблицу перестроим таким образом, чтобы ее первая и вторая группы разделялись на подгруппы, тем самым выяснив, выявляет ли параметр состояние объекта или нет, и произведем вычисление $I_3(y_j)$ по выражению (5) для всех оставшихся значений и занесем их в третью таблицу.

Таким образом, параметры y_2 , y_1 и y_3 будут содержать полную информацию о состоянии объекта, то есть неопределенность полностью устранена, и с помощью этих параметров можно установить все возможные его состояния.

Библиографический список

1. Пивоваров, В. А. Диагностика летательных аппаратов и авиационных двигателей / В. А. Пивоваров; МГТУ ГА. М., 1995.
2. Воробьев, В. Г. Надежность и эффективность авиационного оборудования / В. Г. Воробьев, В. Д. Константинов. М.: Транспорт, 1995.

V. V. Lukasov

OPTIMIZATION OF THE SET OF DIAGNOSTIC PARAMETERS

The article is devoted to the optimization of the set of diagnostic parameters of aeronautical engineering, which is based on the analysis of conditions table.

Ю. В. Максимов, В. Е. Патраев, В. А. Тололо

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Предложена модель для проектной оценки надежности космического аппарата.

Для космического аппарата (КА) как сложного технического устройства актуальна проблема разработки адекватной математической модели для проектной оценки его надежности. Космический аппарат целесообразно рассматривать как K -компонентную систему с компонентами (бортовыми системами), имеющими структурную избыточность на уровне оборудования бортовых систем.

В контрактных документах для КА задается основной показатель надежности в виде требуемого срока активного существования T_{ac} , поэтому состояние i -й бортовой системы можно описать бинарной переменной [1], принимающей следующие значения ($i = 1, 2, \dots, K$):

$$S(T_{ac}^{(i)}) = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я бортовая система сохраняет работоспособность} \\ & \text{за время } T_{ac}, \\ 0 & \text{– в противоположном случае,} \end{cases}$$

где $T_{ac}^{(i)}$ – срок службы i -й бортовой системы. Аналогично для состояния КА в целом можно записать

$$S(\vec{T}_{ac}) = \begin{cases} 1, & \text{если КА сохраняет работоспособность за время } \vec{T}_{ac}, \\ 0 & \text{– в противоположном случае,} \end{cases}$$

где $\vec{T}_{ac} = (T_{ac}^{(1)}, T_{ac}^{(2)}, \dots, T_{ac}^{(K)})$ – вектор сроков службы K бортовых систем.

Состояние КА в целом может быть представлено выражением

$$S(\vec{T}_{ac}) = \psi(S(T_{ac}^{(1)}), S(T_{ac}^{(2)}), \dots, S(T_{ac}^{(K)})), \quad (1)$$

где ψ – структурная функция системы – функция множества состояний $S(T_{ac}^{(i)})$ с возможными значениями 0 и 1 для каждого.

Время безотказной работы (ВБР) i -й бортовой системы в течение времени $T_{ac}^{(i)}$ определяется как

$$P(S(T_{ac}^{(i)}) = 1) = P(T_{ac}^{(i)}), \quad i = 1, 2, \dots, K, \quad (2)$$

где $P(T_{ac}^{(i)})$ – ВБР i -й бортовой системы в течение времени $T_{ac}^{(i)}$. Аналогично для КА в целом

$$P(S(\vec{T}_{ac}) = 1) = P(\vec{T}_{ac}), \quad (3)$$

где $P(\vec{T}_{ac})$ – ВБР КА в течение времени \vec{T}_{ac} .

Для проектной оценки надежности КА актуальной является задача определения ВБР $P(\vec{T}_{ac})$ космического аппарата по известным ВБР $P(T_{ac}^{(i)})$ бортовых систем КА и структурной функции ψ .

Поскольку отказ любой бортовой системы из состава КА приводит к невозможности выполнения целевой функции космического аппарата, то ВБР КА в самом общем виде можно представить как

$$P(\vec{T}_{ac}; \vec{\theta}) = P\{\vec{X} \geq \vec{T}_{ac}; \vec{\theta}\} \equiv P\{X^{(1)} \geq T_{ac}^{(1)}, X^{(2)} \geq T_{ac}^{(2)}, \dots, X^{(K)} \geq T_{ac}^{(K)}; \vec{\theta}\}, \quad (4)$$

где $\vec{X} = (X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(K)})$ – случайный вектор сроков службы K бортовых систем (K -мерная случайная величина); $\vec{\theta}$ – параметрический вектор – набор параметров, определяющий вид распределения.

Поставленная задача сводится к исследованию определенной области K -мерного пространства, в которой случайный вектор \vec{X} имеет характерное распределение $P\{\vec{X} \geq \vec{T}_{ac}; \vec{\theta}\}$.

Для независимых случайных величин $X^{(i)}$ выражение (4) для ВБР КА становится равным

$$P(\vec{T}_{ac}; \vec{\theta}) = \prod_{i=1}^K P(T_{ac}^{(i)}; \theta), \quad (5)$$

где $P(T_{ac}^{(i)}; \theta)$ – ВБР i -й бортовой системы.

Если Δ_K – область множества значений $\vec{X} \geq \vec{T}_{ac}$, то ВБР КА можно представить как

$$P(\vec{T}_{ac}; \vec{\theta}) \equiv P^{(S)}(\vec{T}_{ac}; \vec{\theta}) = P\{(\vec{X} \in \Delta_K) \geq \vec{T}_{ac}; \vec{\theta}\}, \quad (6)$$

где S – индекс, обозначающий структуру с последовательным соединением основных компонентов, характерную для КА в целом.

При анализе ВБР бортовых систем КА рассматриваются системы самонаведения (ССН), образованные из конечного набора последовательных и параллельных ССН путем их соединения в более крупные ССН определенного типа. В этом случае ССН бортовой системы с параллельными структурами зависит от схемы задействования резерва определенного типа.

Для схем с нагруженным резервом функция ВБР бортовой системы имеет вид

$$P(T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta}) = 1 - P\{\max_{N_i}(X^{(i1)}, X^{(i2)}, \dots, X^{(iN_i)}) < T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta}\}, \quad (7)$$

где N_i – количество параллельно соединенных элементов (последовательных цепей) в i -й бортовой системе; $X^{(ij)}$ – случайная величина срока службы j -го элемента i -й бортовой системы ($j = 1, 2, \dots, N_i$); $\max_{N_i}(X^{(i1)}, X^{(i2)}, \dots, X^{(iN_i)})$ – функция, равная максимальному значению из N_i величин, приведенных в круглых скобках.

Если $\Delta^{(i)}$ – область значений $X^{(i)} < T_{ac}^{(i)}$, то ВБР КА становится равной

$$P(T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta}) \equiv P^{(P)}(T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta}) = 1 - P\{(\max_{N_i}(X^{(i1)}, X^{(i2)}, \dots, X^{(iN_i)}) \in \Delta^{(i)}) < T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta}\}, \quad (8)$$

где P – индекс, обозначающий структуру с параллельным соединением элементов.

Для бортовой системы, в которой применяется резервирование замещением, ВБР при абсолютной надежности и мгновенной работе переключателей и индикатора отказов составляет

$$P^{(P)}(T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta}) = P\left\{\sum_{j=1}^{N_i} X^{(ij)} > T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta}\right\}. \quad (9)$$

В общем случае, если все элементы одинаковы (идентичны) и независимы друг от друга в смысле надежности, то функция ВБР для i -й бортовой системы

$$P(T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta}) = [P_x(T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta})]^{M_i} \left\{1 + \sum_{j=1}^{N_i - M_i} \frac{[1 - P_x(T_{ac}^{(i)}; \vec{\theta})]^j}{j!} \cdot \prod_{m=0}^{j-1} \left(m + \frac{M_i}{b_i}\right)\right\}, \quad (10)$$

где N_i – общее количество элементов или цепей (параллельных друг к другу с целью резервирования) в i -й бортовой системе; M_i – количество основных элементов в i -й бортовой системе; $(N_i - M_i)$ – количество резервных (нагруженных или ненагруженных) элементов в i -й бортовой системе; $P_3(T_{ac}^{(i)}; \bar{\theta})$ – ВБР элемента i -й бортовой системы в рабочем режиме; $P_x(T_{ac}^{(i)}; \bar{\theta})$ – ВБР элемента i -й бортовой системы в режиме хранения;

$$b_i = \frac{\ln[P_x(T_{ac}^{(i)}; \bar{\theta})]}{\ln[P_3(T_{ac}^{(i)}; \bar{\theta})]}.$$

Формула (10) является универсальной, так как по ней можно получить формулу для любого вида резервирования при следующих условиях:

– при $P_x(T_{ac}^{(i)}; \bar{\theta}) = P_3(T_{ac}^{(i)}; \bar{\theta})$ и $M_i = 1$ получается формула для постоянного резервирования;

– при $P_x(T_{ac}^{(i)}; \bar{\theta}) = 1$ и $M_i = 1$ – формула для резервирования замещением;

– при $P_x(T_{ac}^{(i)}; \bar{\theta}) = P_3(T_{ac}^{(i)}; \bar{\theta})$ – формула для резервирования голосованием по мажоритарной схеме « M_i из N_i »;

– при $M_i = 1$ – формула для резервирования замещением с учетом хранения ненагруженных резервных элементов в i -й бортовой системе.

Приведенные модели надежности КА и бортовых систем являются основой для расчета надежности КА на любом уровне. Они позволяют в рамках определенных допущений выстраивать структурные схемы надежности бортовых систем и оборудования и оценивать надежность с любыми основными вариантами соединения элементов в ССН:

– последовательное соединение n элементов (последовательная цепь);

– параллельное соединение N цепей, обеспечивающее постоянное резервирование (все цепи нагруженные);

– параллельное соединение N цепей, обеспечивающее резервирование замещением (M цепей – основные (нагруженные), остальные $(N - M)$ цепей – резервные ненагруженные цепи);

– параллельное соединение двух цепей, обеспечивающее резервирование замещением (одна цепь – основная (нагруженная) и одна цепь – резервная ненагруженная, отличающаяся по структуре от основной цепи);

– параллельное соединение N цепей, обеспечивающее резервирование замещением (одна цепь – основная (нагруженная), остальные $(N - 1)$ цепи – резервные ненагруженные; учитывается надежность при хранении ненагруженных цепей);

– параллельное соединение цепей, обеспечивающее резервирование голосованием по мажоритарной схеме « M из N » (все N цепей – нагруженные, любые M из N цепей – основные);

– однофункциональная схема с разветвленной структурой и одинаковой надежностью элементов (так называемая мостиковая схема соединения элементов).

Все перечисленные выше основные варианты соединения элементов в ССН приведены в таблице.

В таблице использованы следующие обозначения:

– $p(t) = e^{-\Lambda t}$, откуда $\Lambda t = -\ln P(t)$ – ВБР последовательной цепи элементов подчиняется экспоненциальному закону;

– t – время эксплуатации;

– n – количество последовательно соединенных элементов разного типа;

– l_i – интенсивность отказов при эксплуатации для отдельного элемента i -го типа ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

– k_i – количество элементов i -го типа ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

– l_{xi} – интенсивность отказов при хранении для отдельного элемента i -го типа ($i = 1, 2, 3, \dots, n$);

– $\Lambda = \sum_{i=1}^n k_i \lambda_i$ – суммарная интенсивность отказов при эксплуатации для всех элементов последовательной цепи;

– $\Lambda_x = \sum_{i=1}^n k_i \lambda_{xi}$ – суммарная интенсивность отказов при хранении для всех элементов последовательной цепи;

– $P_i(t) = e^{-k_i \lambda_i t}$ – вероятность безотказной работы при эксплуатации для всех элементов i -го типа последовательной цепи;

– $P_{xi}(t) = e^{-k_i \lambda_{xi} t}$ – вероятность безотказной работы при хранении для всех элементов i -го типа последовательной цепи;

– $p(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = e^{-\Lambda t}$ – вероятность безотказной работы при эксплуатации для всех элементов последовательной цепи;

– $p_x(t) = \prod_{i=1}^n P_{xi}(t) = e^{-\Lambda_x t}$ – вероятность безотказной работы при хранении для всех элементов последовательной цепи;

– $P(t)$ – ВБР всей резервированной схемы;

– N – количество параллельно соединенных последовательных цепей в схеме;

– M – количество основных цепей, определяющих работоспособность всей схемы, которые резервируются остальными $(N - M)$ резервными цепями;

– $p_n(t)$ – вероятность безотказной работы при эксплуатации для ненагруженной резервной цепи, отличающейся от основной (нагруженной) цепи;

– $C_b^a = \frac{b!}{a!(b-a)!}$, где $a \leq b$ – биномиальный коэффициент (a, b – целые числа).

Рост требований к таким показателям надежности создаваемых КА, как сроки активного существования и ВБР и эффективности полезной нагрузки, ведет к усложнению схем, увеличению кратности резервирования, необходимости применения различных режимов работы элементов и функциональных устройств. Например, практика показывает, что разработчики некоторых радиоэлектронных систем (РЭС) для перспективных КА длительного функционирования часто испытывают трудности в выборе корректных математических моделей при проведении проектных (априорных) расчетов ВБР радиоэлектронных систем, работающих в сеансном режиме, используя при этом усредненные значения интенсивностей отказов приборов РЭС за время работы и время хранения. Между тем, в практике работы Научно-производственного объединения прикладной механики имени академика М. Ф. Решетнева в развитие методологии [2] используется апробированный метод точной оценки ВБР РЭС, работающих в сеансном режиме с чередованием времени работы и времени хранения [3].

Варианты соединения основных и резервных элементов в ССН

Соединение элементов в ССН	Графическое изображение	Формула ВБР
Последовательное соединение элементов (последовательная цепь)		$p(t) = \prod_{j=1}^n p_j(t) = e^{-\Lambda t}$
Параллельное соединение N цепей, обеспечивающее постоянное резервирование (все цепи нагруженные)		$P(t) = 1 - [1 - p(t)]^N$
Параллельное соединение цепей, обеспечивающее резервирование замещением (M цепей основные (нагруженные) цепи, остальные ($N-M$) цепей – резервные ненагруженные цепи)		$P(t) = p^M(t) \left(1 + \sum_{j=1}^{N-M} \frac{(-M \ln p(t))^j}{j!} \right)$
Параллельное соединение цепей, обеспечивающее резервирование замещением (одна цепь рабочая и одна ненагруженная цепь, отличающаяся по структуре от рабочей цепи)		$P(t) = p(t) + [p_h(t) - p(t)] \frac{\ln p(t)}{\ln \frac{p(t)}{p_h(t)}}$
Параллельное соединение цепей, обеспечивающее резервирование замещением (одна цепь рабочая, остальные ($N-M$) цепи – ненагруженные цепи, учитывая надежность при хранении ненагруженных цепей)		$P(t) = p(t) \left(1 + \sum_{j=1}^{N-1} \frac{[1 - p_x(t)]^j}{j!} \times \prod_{m=0}^{j-1} \left(m + \frac{\ln p(t)}{\ln p_x(t)} \right) \right)$
Параллельное соединение цепей, обеспечивающее резервирование голосованием по мажоритарной схеме « M из N » (все N цепей – нагруженные, любые M из N цепей – основные)		$P(t) = \sum_{j=M}^N C_N^j \cdot p^j(t) [1 - p(t)]^{N-j}$
Однофункциональная схема с разветвленной структурой и одинаковой надежностью элементов (мостиковая схема соединения элементов)		$P(t) = p(t) (1 - [1 - p(t)]^2)^2 + [1 - p(t)] (1 - [1 - p^2(t)]^2)$

Согласно этому методу априорная оценка ВБР РЭС для каждого промежутка времени с длительностью aT , в течение которого система работает, для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы может быть определена по формуле (10), которая учитывает полную группу работоспособных состояний системы и пригодна для любого вида резервирования:

$$P_{\text{эмк}}(aT) = [\exp(-\lambda, aT)]^M \left\{ 1 + \sum_{j=1}^K \frac{[1 - \exp(-\lambda_x aT)]^j}{j!} \prod_{i=0}^{j-1} \left(i + \frac{M}{b} \right) \right\}, \quad (11)$$

где T – длительность сеанса работы РЭС; α – доля сеанса T , в течение которого РЭС работает; M – количество ос-

новных комплектов прибора РЭС; K – количество резервных нагруженных или ненагруженных комплектов прибора РЭС; $N = K + M$ – общее количество комплектов прибора РЭС; λ_s – интенсивность отказов комплекта прибора при эксплуатации; λ_x – интенсивность отказов комплекта прибора при хранении; $b = \frac{\lambda_x}{\lambda_s}$.

Формула (11), также как и формула (10), является универсальной, так как по ней можно получить формулу для любого вида резервирования при следующих условиях:

– при $\lambda_x = \lambda_s$ и $K = 1$ получаем формулу для постоянного резервирования;

– при $\lambda_x = 0$ и $K = 1$ – формулу для резервирования замещением;
 – при $\lambda_x = \lambda_y$ – формулу для резервирования голосованием по схеме « K из N » (мажоритарная схема);
 – при $K = 1$ – формулу для резервирования замещением с учетом хранения ненагруженных резервных комплектов прибора.

Аналогично априорная оценка ВБР РЭС для каждого промежутка времени с длительностью $(1 - \alpha)T$, в течение которого система хранится, для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы рассчитывается по формуле (11), учитывающей полную группу работоспособных состояний системы (положив $\lambda_y = \lambda_x$):

$$P_{\text{хмк}}((1 - \alpha)T) = [\exp(-\lambda_x(1 - \alpha)T)]^M \times \left\{ 1 + \sum_{j=1}^K \frac{[1 - \exp(-\lambda_x(1 - \alpha)T)]^j}{j!} \prod_{i=0}^{j-1} (i + M) \right\}, \quad (12)$$

где $\prod_{i=0}^{j-1} (i + M) = \frac{(M - 1 + j)!}{(M - 1)!}$.

Отсюда вытекает, что в случае $M = 1$ можно получить формулу для постоянного резервирования, при $M > 1$ –

формулу для резервирования голосованием по мажоритарной схеме « K из N ».

Априорная оценка ВБР РЭС для полного времени эксплуатации системы рассчитывается по формуле

$$P_{\text{рэс}}(t) = [P_{\text{эмк}}(\alpha T) \cdot P_{\text{хмк}}((1 - \alpha)T)]^\varepsilon, \quad (13)$$

где t – полное время эксплуатации РЭС; $\varepsilon = \frac{t}{T}$ – количество сеансов за время эксплуатации РЭС.

Библиографический список

1. Проектирование надежных спутников связи / под ред. М. Ф. Решетнева. Томск: МГП «РАСКО», 1993. 221 с.
2. Владимирович, Г. И. Теория надежности радиоэлектронной аппаратуры / Г. И. Владимирович, Н. М. Седякин; ЛВИКА им. Можайского. Л., 1988. 475 с.
3. Патраев, В. Е. Проектная оценка надежности радиоэлектронных систем, работающих в сеансном режиме / В. Е. Патраев, В. А. Тололо // Решетневские чтения: тез. докл. VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию акад. М. Ф. Решетнева / СибГАУ. Красноярск, 2004. С. 25–27.

Ju. V. Maksimov, V. E. Patraev, V. A. Tololo

MODEL OF RELIABILITY OF THE SATELLITE

The model for a design estimation of reliability of the satellite is offered.

Е. Н. Окладникова, Е. В. Сугак

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА

Рассматривается вероятностная оценка полного и остаточного технического ресурса узлов трения и износа, модели изменения определяющих параметров изделий машиностроения. Представлены результаты вероятностно-статистической оценки предельного износа стенок шарового резервуара в условиях коррозионного износа.

При эксплуатации любых технических систем происходит старение их элементов в результате различных механических, тепловых, электрических и других физико-химических процессов, а также под воздействием внешних и внутренних нагрузок различной природы. Эти процессы и факторы вызывают накопление повреждений, развитие дефектов, необратимые изменения свойств конструкционных материалов и параметров элементов технических систем и, как следствие, постепенное снижение их функциональной способности. Это впоследствии приводит к их отказам и, в конце концов, к наступлению предельного состояния, после чего их дальнейшая эксплуатация становится невозможной [1].

Ресурс узлов трения и износа является важной технико-экономической характеристикой. При современном состоянии науки и техники возможно весьма значительное повышение ресурса узлов трения путем более грамотного подхода к их расчету и проектированию. Правильный выбор материалов и правильный расчет являются основными источниками повышения ресурса. Особое место в увеличении сроков эксплуатации занимает прогнозирование ресурса на стадии эксплуатации, когда прогнозу подлежат конкретные существующие объекты. Индивидуальное прогнозирование ресурса открывает дополнительные пути для получения экономического эффекта. На внедрение индивидуального прогнозирования требует дополнительных расходов на средства технической диагностики, разработку математических методов и программного обеспечения, позволяющих получать обоснованные выводы на основе собранной информации. Прогнозирование индивидуального ресурса включает целый комплекс задач: оценку текущего состояния объекта, прогнозирование развития этого состояния на ближайшее будущее, выдачу на основе этого прогноза рекомендаций об оптимальном остаточном сроке службы.

Техническое состояние любого изделия оценивается по значениям одного или нескольких определяющих параметров (например, степени износа или коррозии). Отказ или предельное состояние можно представить как выход определяющих параметров за пределы допустимых значений (области работоспособности) [1]. Поэтому характер изменения определяющих параметров в процессе эксплуатации позволяет вычислить технический ресурс (или срок службы) изделия и во многом рассчитать эффективность его использования.

При оценке ресурса по определяющему параметру $X(t)$ (рис. 1) наиболее распространенной, в первую очередь благодаря своей простоте является линейная аппроксимация (рис. 1, а) [1...5]:

$$X(t) = X_0 + \gamma t, \quad (1)$$

где X_0 – начальное значение определяющего параметра; γ – скорость изменения параметра.

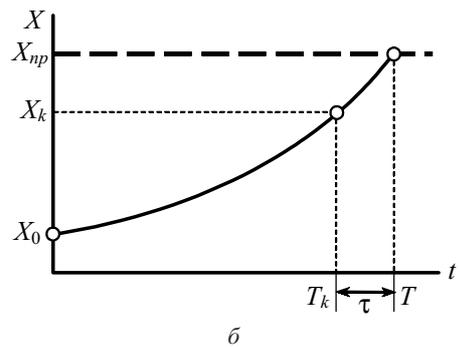
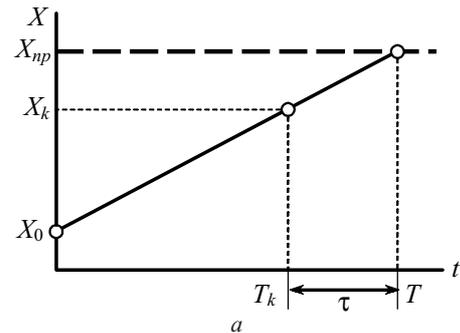


Рис. 1. Изменение определяющего параметра

В этом случае оценка полного T и остаточного ресурса τ (после контроля или диагностики) при известном значении γ производится решением уравнения (1) при $X = X_{np}$:

$$T = \frac{X_{np} - X_0}{\gamma},$$

$$\tau = \frac{X_{np} - X_k}{\gamma} = \frac{X_{np} - (X_0 + \gamma T_k)}{\gamma}. \quad (2)$$

Величина предельного износа X_{np} определяется по условию прочности деталей, точности перемещения звеньев, требованиям нормативно-технической документации или исходя из требований безопасности.

Однако в большинстве практически значимых случаев линейную аппроксимацию (1) можно считать лишь грубым приближением к описанию реальных процессов. В более общей форме деградиационные процессы старения и износа описываются зависимостью полиномиального вида (табл. 1) [1; 2]:

$$X(t) = X_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_n t^n. \quad (3)$$

В этом случае оценка полного и остаточного ресурса при известных значениях коэффициентов c , c_n и n производится решением уравнения (3) при $X = X_{np}$ (рис. 1, б).

Несмотря на широкое использование аппроксимационных зависимостей (1) и (3), в большинстве реальных

случаев монотонная зависимость определяющего параметра X от времени (или наработки) t не наблюдается. Во-первых, из-за разброса свойств конструкционных материалов и нестабильности технологии изготовления элементов начальное значение определяющего параметра X_0 является случайной величиной (для него часто принимается нормальное или усеченное нормальное распределение в пределах поля допуска по закону «трех сигм»). Во-вторых, нестабильность и неопределенность условий эксплуатации и нагрузок часто приводит к случайному характеру скорости изменения определяющего параметра $\dot{\gamma}$ в уравнении (1) или коэффициентов c_1, c_n и показателя степени n в уравнении (3), для которых, как правило, также принимается нормальное распределение.

Тогда параметрическая модель износа или старения элемента в простейшем случае может быть описана дифференциальным уравнением [2; 5]

$$\frac{dX(t)}{dt} = \gamma(t) + h(t), \quad (4)$$

где $\gamma(t)$ – нормальная случайная величина, в общем случае зависящая от времени; $h(t)$ – нормальный эргодический стационарный случайный процесс с математическим ожиданием $\mu_h = 0$.

Уравнение (4) порождает случайный процесс вида

$$X(t) = X_0 + \int_0^t \gamma(t) dt + \int_0^t h(t) dt, \quad (5)$$

в котором начальное значение параметра X_0 является неслучайной величиной для каждого изделия и случайной величиной для совокупности изделий.

Схема формирования закона распределения ресурса элемента $f(T)$, при котором в результате каких-либо процессов (повреждения, износа, старения, разрегулирования и т. д.) происходит постепенное изменение определяющего параметра X [10] показана на рис. 2.

В начале эксплуатации имеет место рассеивание начального значения определяющего параметра $f(X_0)$ относительно своего математического ожидания X_0 , которое может быть связано с нестабильностью свойств матери-

алов и технологии изготовления элемента, другими внутренними и внешними причинами. Затем в процессе эксплуатации элемента определяющий параметр под действием происходящих в нем процессов начинает ухудшаться (в общем случае изменение параметра может начаться через некоторый промежуток времени от начала эксплуатации, который также является случайной величиной и связан, например, с процессами накопления повреждений). Скорость изменения определяющего параметра $\dot{\gamma}$ зависит от природы процессов износа или старения и в общем случае также является случайной величиной. В результате всех этих процессов и явлений происходит формирование закона распределения определяющего параметра в произвольный момент времени $f(X, t)$. Эти процессы, в частности, приводят к тому, что в момент контроля или диагностики T_k наблюдается разброс значений определяющего параметра X_k совокупности изделий с распределением $f(X_k)$ и, соответственно, разброс значений полного ресурса с распределением $f(T)$ (рис. 2, а).

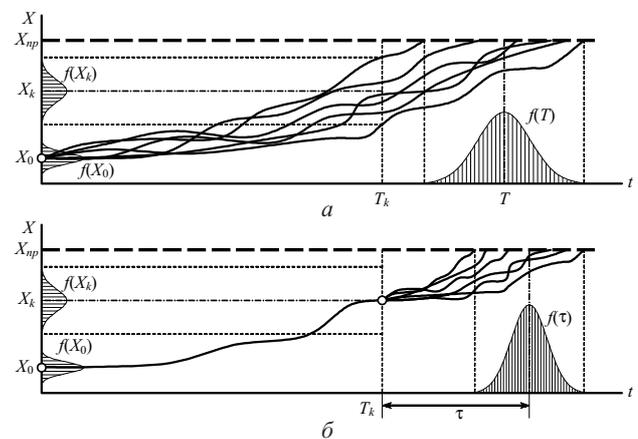


Рис. 2. Схемы формирования полного (а) и остаточного (б) ресурсов

Разброс начального значения определяющего параметра $f(X_0)$ следует учитывать при оценке ресурса неко-

Таблица 1

Модели изменения определяющих параметров изделий машиностроения [7...10]

Устройство	Определяющий параметр X	Процесс	Математическая модель
Клапан силового цилиндра	Размер уплотнения	Изменение состояния и свойств материала под воздействием повторных переменных напряжений	$\Delta X(t) = ct^n$
Торцевое уплотнение плунжерной пары насоса	Величина зазора	Механический абразивный износ	$\Delta X(t) = ct^n$
Кран (вентиль)	Конусность	Контактная усталость рабочих поверхностей с образованием микротрещин и других дефектов	$\Delta X(t) = ct$
Вал	Изменение диаметра вала	Окисление поверхностных слоев и разрушение окислов	$\Delta X(t) = c_1t + c_2t^2$
Распределительное устройство гидросистемы	Величина потока жидкости	Изменение состояния и свойств материала деталей	$\Delta X(t) = ct$
Гидро- и пневмоцилиндры	Величина утечки жидкости или газа	Изменение состояния и свойств материала деталей	$\Delta X(t) = ct^n$
Насос (гидромотор) гидропривода	Перепад давления	Изменение состояния и свойств материала деталей	$\Delta X(t) = ct^n$
Двигатель внутреннего сгорания	Мощность	Изменение состояния и свойств поршневых колец (отрыв частиц горячим газом)	$\Delta X(t) = c_1t + c_2t^2$
Пресс	Усилие прижатия	Изменение состояния и свойств материала деталей	$\Delta X(t) = ct^n$
Химический реактор	Величина коррозионного износа	Коррозия материала	$\Delta X(t) = ct$

торой совокупности элементов (например, партии деталей). Для одного же конкретного элемента значение X_0 является конкретной неслучайной величиной. Если же рассматривается поведение элемента в различных случайных режимах работы под воздействием случайных внешних факторов, то и в случае одного элемента параметр X_0 следует рассматривать как случайную величину.

Примерно та же картина наблюдается при оценке остаточного ресурса по результатам контроля или диагностики элемента (рис. 2, б). Случайный характер условий эксплуатации и нагрузок приводит к формированию распределения величины остаточного ресурса $f(t)$ от момента контроля T_k до перехода в предельное состояние.

Очевидно, что при расчете полного или остаточного ресурсов детерминированными методами, в частности по формулам (1)...(3), при использовании средних значений (или математических ожиданий) величин X_0, γ, c, c_n, n и X_k определяются только некоторые их средние значения T и τ (не обязательно математические ожидания). Согласно схеме (см. рис. 2, а) становится очевидным, что к моменту T (среднему значению ресурса, полученного детерминированным расчетом) половина из всей совокупности изделий достигнет предельного состояния, или, что то же самое, любое из них достигнет предельного состояния с вероятностью 50%. Поэтому такая детерминированная оценка ресурса может считаться приемлемой только в тех редких случаях, когда выход из строя элемента не приводит к серьезным последствиям. В случаях когда отказ или наступление предельного состояния могут привести к существенным экономическим потерям или возникновению аварийной ситуации, необходимо использовать вероятностно-статистический подход, при котором ресурс оценивается исходя из заданной вероятности его исчерпания, вероятности отказа q или вероятности безотказной работы p .

Следует отметить, что такие задачи имеют аналитическое решение только в некоторых простейших случаях. Например, при нормальном распределении определяющего параметра

$$f(X) = \frac{1}{\sigma_X(t)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[X(t) - \mu_X(t)]^2}{2\sigma_X^2(t)}\right\} \quad (6)$$

и линейном изменении математического ожидания $\mu_X(t)$ и среднего квадратического отклонения $\sigma_X(t)$ вида (1)

$$\mu_X(t) = X_0 + ct, \sigma_X(t) = \sigma_0 + bt \quad (7)$$

с известными постоянными значениями параметров X_0, c и σ_0, b функция плотности распределения ресурса $f(T)$ может быть представлена в виде [1]

$$f(T) = -\frac{c\sigma_X(T) + b[X_{np} - \mu_X(T)]}{\sigma_X(T)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[X_{np} - \mu_X(T)]^2}{2\sigma_X^2(T)}\right\} = -\frac{c(\sigma_0 + bT) + b(X_{np} - X_0 - cT)}{(\sigma_0 + bT)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{np} - X_0 - cT}{\sigma_0 + bT}\right)^2\right]. \quad (8)$$

При нормальном распределении определяющего параметра (6) с математическим ожиданием $\mu_X(t)$ и средним квадратическим отклонением $\sigma_X(t)$ вида (3)

$$\mu_X(t) = X_0 + ct^n, \sigma_X(t) = \sigma_0 + bt^m \quad (9)$$

с известными постоянными значениями параметров X_0, c, n и σ_0, b, m функция плотности распределения ресурса $f(T)$ [2; 11] имеет вид

$$f(T) = -\frac{cnT^{n-1}\sigma_X(T) + bmT^{m-1}[X_{np} - \mu_X(T)]}{[\sigma_0 + b \exp(mT)]^2 \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[X_{np} - \mu_X(T)]^2}{2\sigma_X^2(T)}\right\} = -\frac{cnT^{n-1}(\sigma_0 + bT^m) + bmT^{m-1}(X_{np} - X_0 - cT^n)}{[\sigma_0 + b \exp(mT)]^2 \sqrt{2\pi}} \times \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{np} - X_0 - cT^n}{\sigma_0 + bT^m}\right)^2\right]. \quad (10)$$

Вероятность перехода изделия в предельное состояние в течение времени t может быть получена исходя из известного соотношения [1; 6]

$$q(t) = \int_0^t f(t) dt. \quad (11)$$

В частности, для нормального закона распределения при $F(0) = 0$

$$q(t) = F\left[\frac{X_{np} - \mu_X(t)}{\sigma_X(t)}\right] = \frac{1}{\sigma_X(t)\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left\{-\frac{[t - \mu_X(t)]^2}{2\sigma_X^2(t)}\right\} dt = \frac{1}{2} + \Phi(z), \quad (12)$$

где $\Phi(z)$ – нормированная функция Лапласа.

Оценка остаточного ресурса производится решением уравнения (11) относительно t при заданном (предельном) значении вероятности перехода изделия в предельное состояние q . Аналогичные зависимости можно использовать при вероятностно-статистической оценке остаточного ресурса.

Вид и параметры распределения определяющего параметра $X(t)$, а также характер их изменения во времени в общем случае устанавливаются экспериментально (по результатам статистической обработки данных испытаний, контроля или диагностики при техническом обслуживании) или принимаются исходя из моделирования процессов, приводящих к отказам.

В качестве примера приведем гистограмму величины коррозионного износа стенок шарового резервуара для хранения бутана, бутилена и изобутилена диаметром 10,5 м емкостью 600 м³ в течение 14 лет эксплуатации, построенная по результатам толщинометрии в 608 точках корпуса¹ (рис. 3). Распределение хорошо аппроксимируется функцией нормального распределения с математическим ожиданием $\mu_X \approx 0,58$ мм и средним квадратическим отклонением $\sigma_X \approx 0,22$ мм. Исходя из линейной зависимости коррозионного износа от времени (по ГОСТ 14249–89 [2]), начальных значений величины износа $X_0 = 0$ и среднего квадратического отклонения, найденного по закону «трех сигм» по допуску на исходную толщину стенки (7), $\sigma_0 = 0,13$ мм, получим $c = 0,04$ мм/год и $b = 0,006$ мм/год.

Величина предельного износа для сосудов, работающих под давлением, рассчитывается по условию прочности. Для сферических элементов минимальная толщина стенки принимается как большее из двух значений, рассчитанных для рабочих условий и условий гидравлических испытаний [13]:

$$s_{min} = \max\left\{\frac{p_p D}{4\phi[\sigma] - p_p}; \frac{p_u D}{4\phi[\sigma]_u - p_u}\right\}, \quad (13)$$

¹Данные предоставлены Красноярским филиалом ООО ИКЦ «Промбезопасность».

где p_p и p_n – расчетное давление и давление при испытаниях, МПа; D – внутренний диаметр сферического элемента, м; $[\sigma]$ и $[\sigma_n]$ – допускаемое напряжение для материала стенок в рабочих условиях и при испытаниях, МПа; ϕ – коэффициент прочности сварных швов (для автоматической дуговой электросварки $\phi = 1,0$).

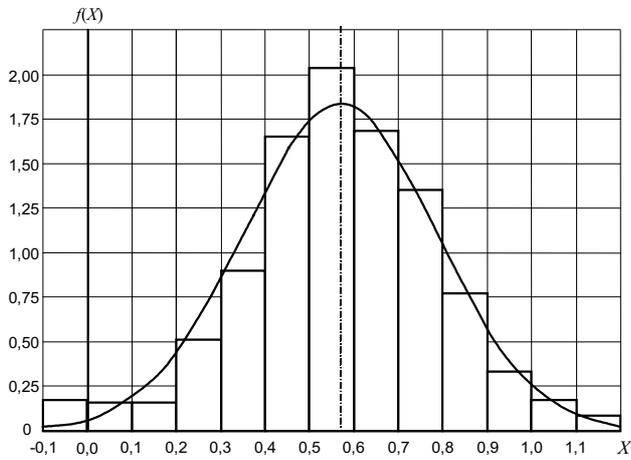


Рис. 3. Гистограмма и плотность распределения величины коррозионного износа стенок резервуара

Для заданных условий эксплуатации ($s_{min} = 11,63$ мм) при исполнительной толщине стенки $\sigma = 16$ мм величина предельного износа $X_{np} = s - s_{min} = 4,27$ мм.

Результаты расчетов вероятности предельного состояния резервуара и оценки ресурса представлены в табл. 2 и 3. Там же для сравнения приведены результаты расчетов для случая, когда известна исполнительная толщина стенки резервуара, т. е. без учета начального разброса определяющего параметра в пределах поля допуска. При этом $\sigma_0 = 0$ и $b = \sigma_x(t) / t = 0,015$ мм/год.

Например, при вероятности предельного состояния $q = 0,0001$ оценка технического ресурса при $\sigma_0 = 0,13$ мм составила $T = 60$ лет, при $\sigma_0 = 0$ $T = 43,4$ года. Очевидно, что в условиях неполной информации необходимо принимать меньшее значение ($T = 48$ лет), так как при этом повышается гарантия работы узла. Соответственно оценка остаточного ресурса составит 29,4 года.

Таблица 2

Зависимость вероятности предельного состояния от срока эксплуатации

Срок эксплуатации $T, лет$	Вероятность предельного состояния	
	$\sigma_0 = 0,13$ мм	$\sigma_0 = 0$
30	-	10^{-10}
40	10^{-12}	10^{-5}
50	10^{-7}	0,0020
60	10^{-4}	0,0255
70	0,0053	0,0983
80	0,0521	0,2128
90	0,1946	0,3402
100	0,4121	0,4585

Вероятностно-статистическая оценка позволяет не только более точно обосновать назначение полного или остаточного ресурсов изделия, но и дает исходные данные для анализа рисков безопасной эксплуатации (риск-анализа) и оптимизации системы технического обслуживания и управления техническим состоянием систем [5].

Таблица 3

Зависимость ресурса от вероятности предельного состояния

Вероятность предельного состояния q	Оценка технического ресурса $T, лет$	
	$\sigma_0 = 0,13$ мм	$\sigma_0 = 0$
10^{-9}	45	32,0
10^{-8}	47	33,5
10^{-7}	51	35,2
10^{-6}	53	37,3
10^{-5}	56	40,0
0,0001	60	43,4
0,001	65	48,1
0,01	72	55,5
0,02	75	58,7
0,03	77	60,9
0,05	80	64,3
0,10	84	70,2

Библиографический список

1. Сугак, Е. В. Надежность технических систем / Е. В. Сугак и др. Красноярск: «РАСКО», 2001. 608 с.
2. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, П. Франкен. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.
3. Дедков, В. К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем / В. К. Дедков, Н. А. Северцев. М.: Высш. шк., 1976. 405 с.
4. Евланов, Л. Г. Контроль динамических систем / Л. Г. Евланов. М.: Наука, 1979. 432 с.
5. Буравлев, А. И. Управление техническим состоянием динамических систем / А. И. Буравлев, Б. И. Доценко, И. Е. Казаков. М.: Машиностроение, 1995. 240 с.
6. Невзоров, В. Н. Надежность машин и оборудования. Ч. 2. Проектирование, эксплуатация, экспериментальные исследования / В. Н. Невзоров, Е. В. Сугак; СибГТУ. Красноярск, 1998. 264 с.
7. Лебедев, В. М. Работоспособность металлических трибосопряжений узлов трения машин / В. М. Лебедев, Н. А. Смирнов; КПИ. Красноярск, 1990. 140 с.
8. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. М.: Логос, 2003. 208 с.
9. Сугак, Е. В. Основы проектирования химических предприятий. Методы проектирования и оптимизации объектов химической техники / Е. В. Сугак; СТИ. Красноярск, 1989. 80 с.
10. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с.
11. Надежность и эффективность в технике: справ. В 10 т. Т. 10. Справочные данные по условиям эксплуата-

ции и характеристикам надежности. М.: Машиностроение, 1990. 336 с.

12. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.

13. ГОСТ 14249–89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. М.: Изд-во стандартов, 1989.

E. N. Okladnikova, E. V. Sugak

PROBABILISTIC ESTIMATE OF KNOTS FRICTION AND WEAR RESOURCE

In this article the probabilistic estimate generated and residual resource of the technical condition knots friction and wear are considered, and the change models of defining parameters machine-buildings wares. The results of the probabilistic static estimate of the limiting wear of the walls of spherical reservoir in conditions of the corrosion wear are shown.

А. С. Орлов, А. К. Шатров

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАГРУЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Рассмотрено распространение ударных воздействий по конструкции космического аппарата, проведены расчеты этих воздействий методом конечно-элементного моделирования.

При эксплуатации космический аппарат (КА) подвергается различного вида ударным воздействиям при транспортировании, разделении ступеней ракеты-носителя (РН), срабатывании механических устройств солнечных батарей, антенн, пиротехнических устройств КА, ракеты и т. д. [1; 2]. Анализ ударного нагружения может проводиться аналитическими, экспериментальными и комбинированными методами.

Из всех видов ударных воздействий наибольшую сложность представляет анализ нагружения КА от собственных пиротехнических устройств и пироустройств ракеты-носителя. Уровни ударных воздействий на КА могут достигать в этих случаях 10 000 g, а необходимый для анализа частотный диапазон составлять 0...10 кГц. Ударные воздействия в области низких и средних частот достаточно подробно исследованы, а наиболее сложным для анализа является диапазон частот 500...10 000 Гц. В дальнейшем мы будем рассматривать именно этот диапазон частот.

Определение ударных воздействий на КА. Внешнее воздействие на КА может быть представлено либо в виде ударного спектра ускорений (УСУ), либо в виде временной зависимости (импульс силы, ускорения или скорость в точке). Вид ударного воздействия должен получаться по результатам расчетных и (или) экспериментальных работ для каждого типа пиротехнических устройств.

Для определения импульса силы могут быть использованы как прямые методы измерений сил, так и восстановле-

ние импульса силы по измерению ускорений, деформаций и скоростей волновода на экспериментальной установке, являющейся модификацией стержня Гопкинса [3; 4].

Исследование распространения ударного воздействия по конструкции КА. Экспериментальные исследования по распространению ударных воздействий по КА проводились в несколько этапов (см. таблицу).

1-й этап. Обработка результатов экспериментов. Процедура обработки выполнялась в следующем порядке:

- первичная обработка. Включает преобразование аналоговых сигналов акселерометров в цифровые с частотой дискретизации не ниже 50 кГц, выявляет и устраняет недостоверные данные, тренды и т. д.;
- вторичная обработка проводится с использованием пакета MATLAB 6.5. Она включает:
 - построение огибающих максимальных и минимальных значений ускорений для точек регистрации;
 - фильтрацию временных сигналов в необходимом диапазоне частот (фильтрация проводилась с помощью фильтра Баттерворта пятого порядка, математическая модель которого в наибольшей степени соответствует реальным средствам измерений)
 - расчет и построение ударных спектров ускорений в диапазоне частот до 10 кГц (добротность $Q = 10$).

После завершения испытаний на ударные воздействия при анализе полученных данных проводилась статистическая обработка результатов измерений.

Объем и этапы проведения испытаний динамических макетов КА

Наименование КА	Силовая конструкция КА типа «Глобус»	КА с МСС SST	«Глонасс-М»	МПН «Экспресс-АМ»	«Гонец»
Количество этапов	4	3	1	2	2
Источник ударного воздействия	РБ 8X54	Этап 1: РБ 8X54 Этап 2: Пирочки СО Этап 2: Пирочки БС	Пирозамки КА «Глонасс-М»	Этап 1: Пирозамки КА «Глонасс-М» Этап 2: HRM	Пирозамки КА «Глонасс-М»
Количество реализаций	Этап 1:10 Этап 2:15 Этап 3:15 Этап 4:42	Этап 1:3 Этап 2:1 Этап 3:1	2	Этап 1: 4 Этап 2: 4	Этап 1: 2 Этап 2: 2
Количество датчиков регистрации	От 4 до 16	64	16	16	16
Количество узлов типа Grid	48384	201706	19875	8671	10550
Кол-во элементов	38291	169634	19083	8306	10320
Типы элементов	CQUAD4 СВЕАМ СНEXА	CQUAD4 СВЕАМ СНEXА	CQUAD4 СВЕАМ СНEXА	CQUAD4 СВЕАМ СНEXА	CQUAD4 СВЕАМ СНEXА

2-й этап. Статистическая обработка результатов измерений распространения ударного воздействия по конструкции КА. В каждой точке конструкции КА, по которой имеются экспериментальные данные, строилась зависимость ускорения от времени. Затем, на основе методов регрессионного анализа строилась модель изменения ускорения по длине рассматриваемых конструкций (клепанной и сварной оболочек). Как известно, ударные нагрузки взрывного типа наилучшим образом описываются экспоненциальной функцией, поэтому функциональную зависимость запишем в виде

$$A_i(l) = A_0 e^{-\alpha(l)},$$

где $A_i(l)$ – амплитуда ускорений в i -й точке контроля на расстоянии l от источника ударного воздействия; A_0 – максимальное значение амплитуды ускорений в точке срабатывания пироустройства; $\alpha(l)$ – коэффициент, зависящий от расстояния l $\alpha(l) = 0,00\alpha_i l$; i – индекс зон с различными коэффициентами α .

На сегодняшний день лучше разработаны основы линейной модели регрессии. Далее представим нелинейную зависимость в виде линейной (путем некоторых преобразований):

$$\ln[A(l) - \varepsilon] = \ln A_0 - 0,00\alpha_i l,$$

что позволяет использовать аппарат анализа линейной регрессии. Погрешность ε принята равной 20 %. Это позволило получить достаточно простые зависимости затухания амплитуды ускорения от расстояния. Массивы данных, обработанные по изложенной выше методике, позволили установить определенные закономерности.

При использовании стандартных пиротехнических устройств КА (разрывных болтов и замков) для типовых конструкций коэффициент α_i может быть принят равным 3 для $l < 300$ мм, 2 для $300 < l < 500$ мм и 1 для $l > 500$ мм. Эти коэффициенты могут увеличены в области $l > 500$ мм до 30 % для КА типа «Горизонт» и уменьшены для конструкций, состоящих из сотовых панелей. Оценка уровней снижения ударных воздействий проводилась по величине амплитуды сигнала виброускорений до и после исследований объекта. Распределение величин снижения ударных воздействий типовыми элементами конструкции КА подчиняется нормальному распределению.

Коэффициенты снижения ударного воздействия стыком конструкции имеют значение 1,7...2,0, фермой – 2,5...3,0 и для металлорезиновых амортизаторов – 10...30 раз.

Известно следующее эмпирическое правило: выборочное распределение можно считать гауссовским (нормальным) распределением, если объем выборки $n \geq 30$. Стандартное отклонение оценок от точного значения в этом случае обратно пропорционально \sqrt{n} . Для некоторых результатов испытаний (испытаний типовой сборки и стандартныхборок в составе КА) объем выборки $n \geq 30$, а для стыков, например, $n \geq 200$). Это подтверждается и результатами обработки.

В целом испытания инженерных макетов КА такому эмпирическому правилу не отвечают, так как количество отработываемых однотипных КА редко превышает 3...4 аппарата ($n \ll 30$). Для оценки таких испытаний рекомендуется применять критерий Стьюдента. В результате статистической обработки было установлено, что численные значения рассматриваемых параметров не зависят друг от друга. Оценки их математического ожидания (разность между математическими ожиданиями, полученными по всем реализациям и по результатам отдельных опытов) оказались близки к нулю, а распределения случайных величин не имеют нескольких вершин и не слишком асимметричны. Поэтому предположение о нормальной распределенности величин проверялось с использованием t -критерия Стьюдента. Гипотеза о том, что случайные величины распределены по нормальному закону, была принята.

Расчет ударного воздействия на КА методом конечно-элементного моделирования. Достоверность результатов численного моделирования складывается из следующих составляющих:

- точности определения внешних воздействий;
- степени подробности геометрического моделирования исследуемого космического аппарата;
- выбора пакета конечно-элементного моделирования, типов конечных элементов и демпфирования (принятие численного метода решения уравнений, описывающих распространение ударных воздействий по конструкции КА);
- выбора типов тестов и видов экспериментальных данных, по которым проводится верификация разработанной модели КА;
- принятия процедуры верификации и величины допустимой погрешности при верификации.

Расчеты проводились с помощью пакета DYTRAN. Сравнение расчетных и экспериментальных значений ускорений по длине различных КА показаны на рис. 1...8.

Отличие расчетных и экспериментальных значений максимальных ускорений по длине КА не превышает погрешностей эксперимента (~20 %).

Библиографический список

1. Гладкий, В. Ф. Динамика конструкции летательного аппарата / В. Ф. Гладкий. М.: Наука, 1979.
2. Pyroshock test criteria: NASA-STD-7003. 1999. May 18.
3. Зукас, Дж. А. Динамика удара / Дж. А. Зукас и др. М.: Мир, 1985.
4. Орлов, А. С. Методика определения параметров ударного воздействия пиросредств / А. С. Орлов, А. К. Шатров // Вестник Сибирского государственного университета имени академика М. Ф. Решетнева: сб. науч. тр. / под ред. проф. Г. П. Белякова; СибГАУ. Вып. 4. Красноярск, 2003. С. 213–218.

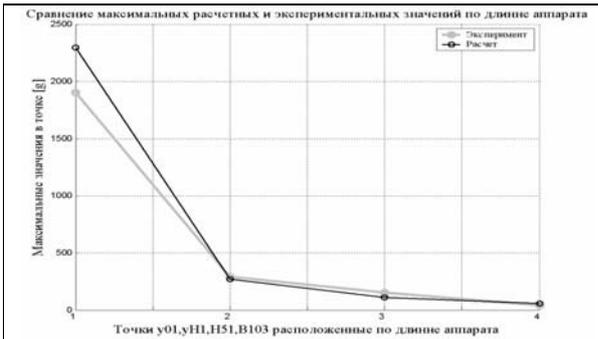


Рис. 1. КА «Глонасс»

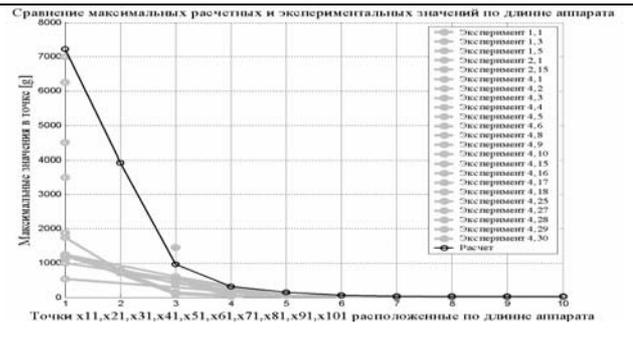


Рис. 2. Подрыв 1-го болта КА «Горизонт»

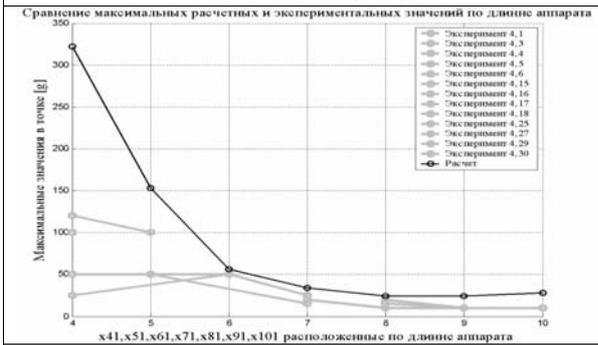


Рис. 3. Подрыв 1-го болта КА «Горизонт»

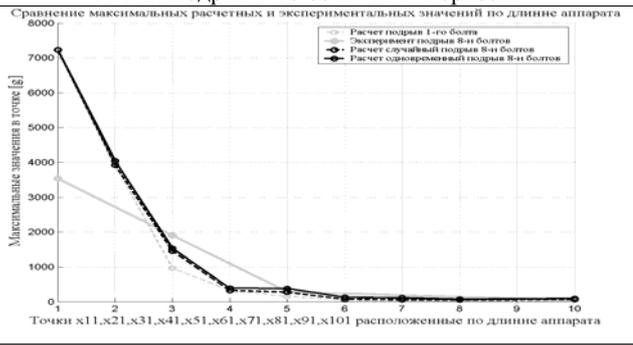


Рис. 4. Подрыв 1-го и 8-и болтов КА «Горизонт»

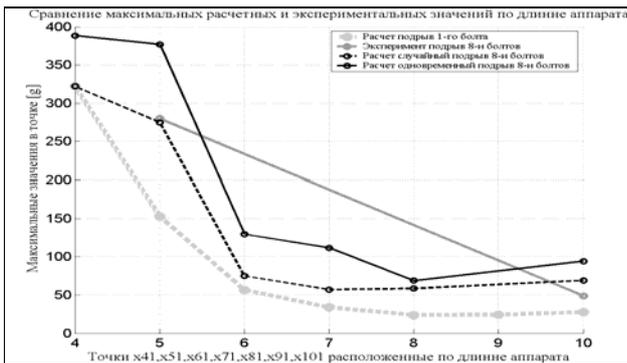


Рис. 5. Подрыв 1-го и 8-и болтов КА «Горизонт»

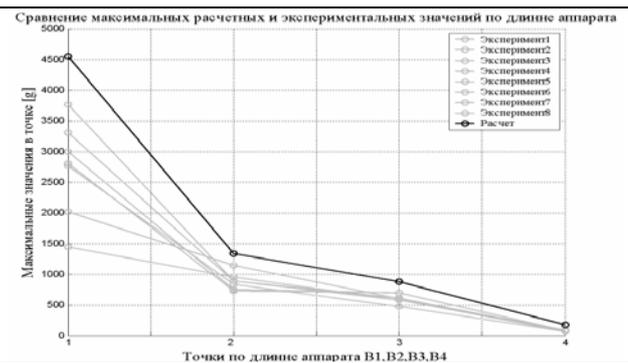


Рис. 6. КА «Экспресс АМ»

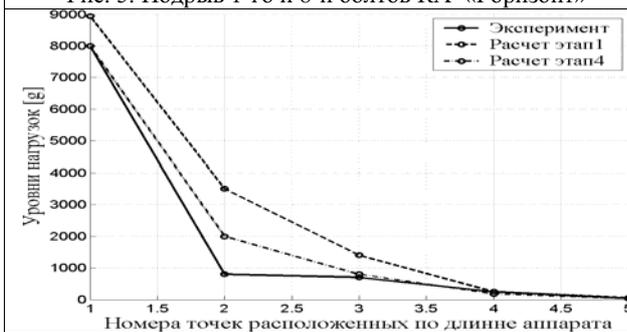


Рис. 7. КА с MCC SST



Рис. 8. КА «Гонец»

A. S. Orlov, A. K. Shatrov

COMPUTATIVE-EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE LOADING OF SPACE CRAFTS IN HIGH-INTENSITY PULSE ACTIONS

Is considered the spread of impact actions as to the construction of space craft, is carried out the calculation of these actions by the method of finite element modelling.

А. А. Павленок, Л. Г. Шаймарданов

ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСОВ АГРЕГАТАМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

В системах воздушных судов гражданской авиации условия нагружения и отработки ресурсов однотипных агрегатов часто существенно различаются. Обсуждается возможность и методология учета этих особенностей и дифференцированного подхода к назначению ресурсов.

В настоящее время в гражданской авиации (ГА) России широко распространена практика эксплуатации воздушных судов (ВС) с индивидуально продленными ресурсами и сроками службы. В рамках данной статьи рассматриваются методологические вопросы эксплуатации на продленных ресурсах ВС Ту-134А на примере парка, состоящего из 4 воздушных судов Ту-134А, одной из сибирских авиакомпаний.

В соответствии с приказом МГА № 139 от 27.07.83 «Об установлении самолетам Ту-134А межремонтного ресурса (срока службы)» для ВС Ту-134А устанавливается межремонтный ресурс, равный 6 000 летным часам (л. ч) на 4 000 полетов в течение 4,5 лет. Однако на основании решения ДПЛГ ГВС и ТР ГА ГСГА МТ РФ № 24.9-113 от 20.12.2002 «Об установлении самолетам Ту-134А, Б, эксплуатирующихся на предприятиях РФ межремонтного ресурса (срока службы)» этот ресурс может быть индивидуально продлен до 8 000 л. ч на 4 000 полетов в течении 9 лет. При этом агрегаты и узлы, входящие в Перечень агрегатов и комплектующих изделий с ограниченным ресурсом для самолетов Ту-134 всех модификаций, утвержденный МАП–МГА 29.12.85–13.02.86, эксплуатируются согласно установленным в нем ресурсам и срокам службы. Так, например, один из основных агрегатов топливной системы ВС ТУ-134А – электроцентробежный насос перекачки топлива ЭЦН-91С (12 агрегатов на самолет) – может эксплуатироваться с межремонтным ресурсом 6 000 л. ч в течение 4,5 лет. При проведении работ по продлению межремонтного ресурса (срока службы) самолета свыше 6 000 л. ч (4,5 лет) насосы ЭЦН-91С, прошедшие ремонт вместе с самолетом и имеющие наработку ППР 6 000 л. ч (4,5 года), подлежат снятию и отправке в ремонт, либо замене на самолеты имеющие остаток межремонтного ресурса. Как показывает практика эксплуатации ВС ТУ-134А, замена насосов ЭЦН-91С в результате отказа агрегата в межремонтный период эксплуатации самолета маловероятна (в описываемом парке ВС за период 2000–2004 гг. насосы ЭЦН-91С по дефекту не снимались). Возникает вопрос о возможном продлении ресурса эксплуатации насосов ЭЦН-91С. Календарный срок службы в данном случае не рассматривается, так как основной причиной выхода из строя насосов ЭЦН-91С по календарному сроку службы является коррозия элементов качающего узла, возникающая при нарушении правил хранения самолета (хранение самолета с незаправленными или заправленными не полностью баками кессонами). Если же в течение межремонтного срока службы самолет на хранение не устанавливается, дефекты такого рода не проявляются.

Особенностью учета наработки насосов ЭЦН-91С при их установке на самолет Ту-134А является то, что с момента установки агрегата его наработка считается по наработке планера. (Например, если самолет выполнил рейс продолжительностью N ч, тогда всем агрегатам, установленным на самолете, к предыдущей наработке прибавляется N ч). Но работа автоматики выработки топлива предусматривает включение-выключение насосов перекачки топлива согласно программе расхода, т. е. фактическое время работы насоса может быть меньше либо равным наработке самолета за рейс, а учитываемая наработка насоса устанавливается строго равной наработке самолета.

Таким образом, задачу по определению возможности эксплуатации насосов ЭЦН-91С с продленным ресурсом можно разделить на следующие этапы:

1. Определение среднего фактического времени работы за рейс каждого насоса ЭЦН-91С в зависимости от места установки насоса.

2. Определение коэффициентов $k_{ip} = \frac{N_{\text{фи}}}{N_{\text{сам}}}$ загруженности насосов, где $N_{\text{фи}}$ – среднее фактическое время работы i -го насоса за рейс; $N_{\text{сам}}$ – наработка самолета за рейс.

3. Периодическая стендовая проверка насоса на соответствие его НТП. В качестве НТП в данном случае выборочно берется ряд эксплуатационно важных параметров насоса, установленных в Технологических указаниях РЗГА № 412 по ремонту электродвигателя МП=100С ТРА МП100С-3с / 72-14 134 Ту-2217 и Технологических указаниях РЗГА № 412 по ремонту насоса ЭНЦ-91С ТРА-ЭНЦ-91С / 61-02 134 Ту-2356 и контроллепригодных в условиях эксплуатации.

4. Учет параметров по результатам стендовой проверки (согласно п. 3) по каждому насосу индивидуально и раздельно по каждому параметру; внесение графиков в паспорт насоса. При этом наработка насоса определяется с учетом коэффициентов k_{ip} .

5. Обработка параметров с использованием известных методов аппроксимации.

6. Приведение кривых к единообразному виду с помощью коэффициентов Δ_{ip} , устанавливающих разницу условия работы насосов.

7. Определение прогнозируемого значения параметра.

8. При следующем пехническом обслуживании (ТО) повторить работы пп. 3...7. При этом полученный согласно п. 3 параметр сравнить с параметром, полученным при предыдущем ТО по п. 7, и прогнозируемым значением параметра.

9. Вычислить погрешность $\delta = \Pi_{\text{фi}} - \Pi_{\text{пр(i-1)}}$, где $\Pi_{\text{фi}}$ – фактическое значение параметра при j -м ТО; $\Pi_{\text{пр(i-1)}}$ – прогнозируемое значение параметра при $(j-1)$ -м ТО; относительная ошибка $\varepsilon = \frac{\delta}{\Pi_{\text{фj}}}$.

10. Работу продолжать до достижения предельного по нормам технических параметров (НТП) значения какого-либо параметра $\Pi_{\text{прj}}$. Если при наработке самолета ППР 6 000 л. ч все параметры не выходят за допуски НТП, то результаты данной работы можно использовать при составлении документации для разработки программы индивидуального продления ресурсов насосам ЭЦН-91С в зависимости от места их установки.

Упрощенно работа топливной системы осуществляется следующим образом.

Баки № 1 и 1а сообщаются между собой трубопроводами, топливо из баков № 1а самотеком поступает в баки № 1. Сообщения между левыми и правыми баками нет. Перекрестное питание двигателей осуществляется через кран кольцевания. При закрытом кране кольцевания от левых баков топливо подается к левому двигателю Д-30 и ВСУ ТА-8, от правых баков – к правому двигателю Д-30.

Выработка топлива производится из расходных отсеков баков № 1 (левый) и № 1 (правый), где установлены по два насоса ЭЦН-45С, подающих топливо к двигателям. Насосы ЭЦН-45С имеют номера № 1 (левый и правый) и № 2 (левый и правый).

В расходные отсеки топливо подается с помощью 12 насосов ЭЦН-91С, по 6 на плоскость, попарно расположенных в баках № 1, 2 и 3. Постоянный уровень топлива в расходном отсеке поддерживается с помощью поплавковых клапанов перекачки, которые закрываются при достижении требуемого уровня топлива в расходном отсеке. Другого сообщения между баками-кессонами нет. Подача топлива из баков № 2 и 3 в расходный отсек осуществляется только по трубопроводам насосов ЭЦН-91С. Обратные клапаны, расположенные за насосом, предотвращают перетекание топлива через насос в бак в случае

отказа одного из насосов. Порядок расхода топлива представлен в табл. 1.

Простейшая графическая схема выработки топлива показана на рисунке, где обозначены интервалы работы насосов групп баков в функции массы топлива.

Согласно этой схеме очевидно, что насосы баков № 2 и 3 работают фактически значительно меньше времени, чем насосы баков № 1. Ресурс же определяют одинаковым для всех насосов ЭЦН-91С вне зависимости от той или иной группы баков. Отсюда можно высказать предположение, что насосы ЭЦН-91С баков № 2 и 3 принимаются в ремонт, не достигнув той же степени износа, что насосы баков № 1. Для того чтобы определить фактическое время работы насосов перекачки каждой групп баков, необходимо учитывать тот факт, что расход топлива из баков определяется расходом топлива двигателей самолета, что в свою очередь зависит от серии двигателя Д-30 (II или III серии), а также от режима работы и высоты полета. Наиболее часто на самолетах устанавливаются двигатели Д-30 II серии, поэтому методику расчета будем строить из предположения, что на самолете установлены двигатели этой серии.

Рейсовый полет включает следующие этапы: взлет (2 мин), набор высоты (25 мин), крейсерский полет на эшелоне, снижение и посадка (20 мин). Поскольку при снижении и посадке режим работы двигателей изменяется от ПМГ до режима максимальной обратной тяги, режим работы двигателей на снижении по расходу топлива условно примем равным крейсерскому, т. е. $0,7 N$ (табл. 2). Следует учитывать, что на самолете Ту-134А установлены 2 двигателя, поэтому значения расходов топлива на самолете следует удваивать.

Таблица 2

Расход топлива двигателей Д-30П

Режим работы	Высота полета	Обозначение	Расход топлива, кг/ч
Взлетный	0	$C_{\text{взл}}$	$2 \cdot 4215 = 8430$
Номинальный	0	C_{N0}	$2 \cdot 2925 = 5850$
Номинальный	11000 м	C_{N11}	$2 \cdot 1435 = 2870$
0.7 номинального	11000 м	$C_{0,7N}$	$2 \cdot 1000 = 2000$

Таблица 1

Порядок работы топливных насосов

Работа топливной автоматики	Остаток топлива			Остаток топлива на самолете
	Бак № 1 и 1а	Бак № 2	Бак № 3	
Включение I очереди	2x4530	2x1750	2x920	14400
Включение II очереди	2x4530	2x1750	2x320	13200
Включение I очереди	2x4430	2x1750	0	12360
Включение III очереди	2x2580	2x1750	0	8660
Включение III очереди	2x1200	0	0	2400

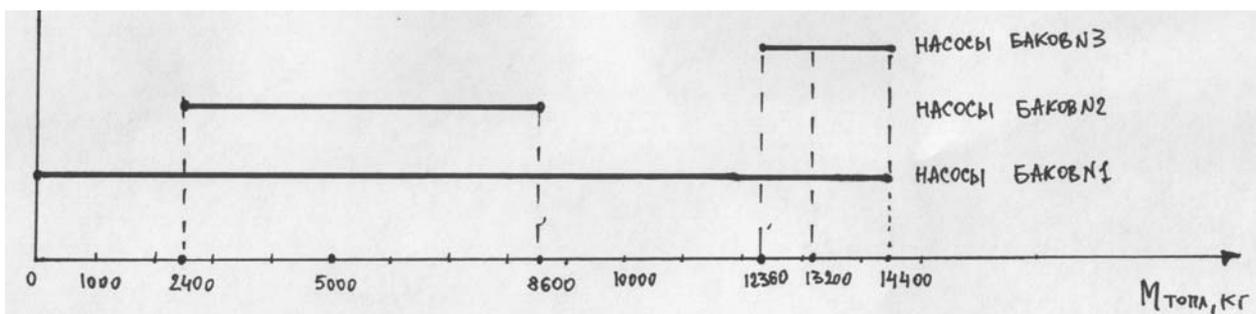


Схема выработки топлива

Поскольку фактическая масса топлива в полете может изменяться в пределах 14 400...2 400 кг (от полной заправки до аварийного остатка топлива), найдем $Q_s = 14\,400 - 2\,400 = 12\,000$ кг.

В любой i -й промежуток времени остаток топлива на самолете определяется по формуле

$$M_i = M_\Sigma - Q_i, \quad (1)$$

где $M_\Sigma = 14\,400$ кг полная заправка или с учетом руления (400 кг):

$$Q_i = \int_0^{t_i} C_i(t) dt, \quad (2)$$

При этом важно определить моменты времени при следующих условиях:

– при остатке топлива $M_2 = 12\,360$ кг (момент выключения насосов баков № 3) (t_2);

– при остатке топлива $M_1 = 12\,560$ кг (момент времени, когда насосы баков № 3 начинают работать «всухую», т. е. без топлива (см. табл. 1) (t_1);

– при остатке топлива $M_3 = 8\,660$ кг (момент включения насосов баков № 2) (t_3);

– при остатке топлива $M_4 = 2\,400$ кг (конец полета и выключение всех насосов) (t_4).

Для упрощения расчетов будем считать линию 2–3 прямой. Определим остаток топлива для этапов полета взлет и набор высоты:

– остаток топлива после взлета

$M_{\text{взл}} = M_\Sigma - C_{\text{твзл}} \cdot t_{\text{взл}} = 14\,400 - 8\,430 \cdot 2 / 60 = 13\,719$ кг (с учетом руления);

– остаток топлива после набора высоты

$$M_{\text{нш}} = M_{\text{взл}} - \frac{C_{\text{тнш}} + C_{\text{тнш}}}{2} \cdot \frac{t_i - t_{\text{взл}}}{60} = 14119 - \frac{2870 + 5850}{2} \cdot \frac{25}{60} = 11902 \text{ кг (с учетом руления).}$$

Отсюда видно, что отключение насосов баков № 3 происходит еще на этапе набора высоты. Следовательно, моменты t_2 и t_1 определяются по формулам

$$M_i = M_{\text{взл}} - \frac{C_{\text{тнш}} + C_{\text{тнш}}}{2} \cdot \frac{t_i - t_{\text{взл}}}{60}, \quad (3)$$

$$C_{\text{тнш}} = C_{\text{тнш}} - \frac{C_{\text{тнш}} - C_{\text{тнш}}}{t_{\text{нш}} - t_{\text{взл}}} \cdot (t_i - t_{\text{взл}}). \quad (4)$$

Таким образом, подставив (4) в (3), получим:

$$M_i = M_{\text{взл}} - \frac{C_{\text{тнш}}(t_i - t_{\text{взл}})}{60} + \frac{(C_{\text{тнш}} + C_{\text{тнш}}) \cdot (t_i - t_{\text{взл}})^2}{120 \cdot (t_{\text{нш}} - t_{\text{взл}})}, \quad (5)$$

или

$$M_i = 13\,719 - \frac{5850(t_i - t_{\text{взл}})}{60} + \frac{2980 \cdot (t_i - t_{\text{взл}})^2}{120 \cdot 25},$$

$$M_i = 13\,719 - 97,5 \cdot (t_i - t_{\text{взл}}) + 0,9933 \cdot (t_i - t_{\text{взл}})^2. \quad (6)$$

Подставляя в (6) значения M_1 и M_2 , получим $t_1 = 16$ мин, $t_2 = 19$ мин.

Однако если учесть время, необходимое для запуска двигателей и руления t_p (около 20 мин), и количество топлива ($\cong 400$ кг) $t_{\text{ф1}} = t_p + t_1 = 36$ мин, $t_{\text{ф2}} = t_p + t_2 = 39$ мин, то получим, что около 3 мин насосы № 3, 4 работают без топлива, что составляет около 0,08 всего времени работы насосов. Поскольку работа без топлива отрицательно сказывается на деталях насоса, то изнашиваться он будет быстрее, т. е. помимо коэффициента загрузки для насосов, установленных в баках № 3, нужно ввести коэф-

фициент R , учитывающий неблагоприятные условия работы. Он определяется эмпирически путем при сравнении параметров насосов № 3 и 1, 2.

Включение и выключение насосов баков № 2 (III очереди) происходит на участке 4...5 (см. рис. 1), т. е. t_i определяется по выражению

$$M_i = M_{\text{нш}} - C_{\text{т0,7N}}(t_i - t_{\text{нш}}), \quad (7)$$

тогда

$$t_i = \frac{M_{\text{нш}} - M_i}{C_{\text{т0,7N}}} + t_{\text{нш}},$$

$$t_{\text{фi}} = t_p + t_{\text{нш}} + \frac{M_{\text{нш}} - M_i}{C_{\text{т0,7N}}}. \quad (8)$$

Подставив в (8) значения M_3 и M_4 , получим $t_{\text{ф3}} = 144$ мин, $t_{\text{ф4}} = 332$ мин. Таким образом, время работы насосов баков № 1 $t_{1Б} = t_{\text{ф4}} = 332$ мин; время работы насосов баков № 2 $t_{2Б} = t_{\text{ф4}} - t_{\text{ф3}} = 188$ мин; время работы насосов баков № 3 (из них без топлива 3 мин) $t_{3Б} = t_{\text{ф2}} = 39$ мин.

Коэффициент загрузки насосов $k_i = \frac{t_{iБ}}{t_{1Б}}$: $k_1 = 1$,

$$k_2 = \frac{188}{332} = 0,57, \quad k_3 = \frac{39}{332} = 0,12.$$

Другими словами, фактическая наработка насосов баков № 1 соответствует учитываемой, для баков 2 составляет 57 % учитываемой, а для баков № 3 – только 12 % учитываемой.

Полученные значения могут быть приняты только как исходные данные для определения фактической наработки при построении кривых изменения параметров, поскольку в реальной эксплуатации такой диапазон изменения количества топлива на борту ВС не всегда реализуется. Для получения доказательных данных по определению возможности эксплуатации насосов ЭЦН-91С на продленных ресурсах необходимо выделить несколько групп насосов:

- А – насос I категории либо ремонтные насосы, имеющие наработку СНЭ не более 25 % назначенного ресурса и количество ремонтов не более 25 % от допускаемого;
- В – ремонтные насосы, имеющие наработку СНЭ и количество ремонтов в диапазоне 26...75 % от назначенного ресурса;
- С – ремонтные насосы, имеющие наработку СНЭ и количество ремонтов 76 % и более от назначенного ресурса.

Внутри каждой группы насосы необходимо учитывать по месту установки (№ бака и № насоса по очереди расхода согласно схеме топливной системы) и самолетам, условию оборачиваемости I, II, III, IV и т. д. Тогда каждый насос возможно однозначно идентифицировать. Кроме того, результаты можно сравнивать как внутри групп, так и по другим признакам: месту установки насоса, самолету и т. д. Это позволит облегчить вывод закономерностей по особенностям работы насосов. Насос будет иметь условный шифр АЗ-4-Л-1, что означает насос первой категории, установленный на самолете № 1, в баке № 3, насосом № 4, левым.

Обработку параметров необходимо производить по следующей методике:

1. При каждом периодическом ТО, т. е. через 500 часов наработки самолета, насосы подлежат съему, с обязательной установкой после ТО на то же место. Каждый насос

устанавливается на стенде для контроля параметров. Предварительный перечень параметров следующий:

– установочная высота щеток электромеханизма МП-100С-3С $h_{\text{щост}}$, мм;

– перепад давления DP_1 на насосе и величина потребляемого J_1 для расхода $Q_1 = 3\ 800$ л/ч, $U_1 = 27$ В на клеммах электромеханизма;

– при $DP_2, J_2, Q_2 = 1\ 500$ л/ч, $U_2 = 27$ В;

– при $DP_3, J_3, Q_3 = 0$ л/ч, $U_3 = 27$ В (режим запираания).

2. По мере накопления данных для каждого насоса строят зависимость параметра от фактической наработки. Фактическую наработку $t_{\text{ф}}$ определяют по наработке самолета $t_{\text{сам}} : t_{\text{ф}} = t_{\text{сам}} \cdot k_i$, где k_i – определенные выше коэффициенты загрузки насосов.

3. Методами аппроксимации строят зависимость $\Pi_i(t_{\text{фи}})$, для определения прогнозируемого значения Π_{i+1} к моменту выхода на следующее ПТО.

4. По мере накопления опытных данных корректируют структуру определяющих факторов.

Предполагается, что определяющим фактором служит место установки насоса и его группы (А, В, или С). В качестве эталонной кривой следует взять зависимости $\Pi_{\text{фи}}(t_{\text{фи}})$ насосов баков № 1 (№ 5 (левый) и 6 (левый и правый)), так как $t_{\text{фи}}$ в данном случае равна $t_{\text{сам}}$.

Износ деталей насосов баков № 3 будет происходить предположительно несколько быстрее, чем баков № 1, так как при каждом включении автоматики выработки топлива (даже при отсутствии топлива в баке № 3)

первая очередь насоса включается на 2...3 мин; что негативно сказывается на состоянии насосов. Напротив, износ деталей насосов баков № 2 будет происходить несколько медленнее, так как выработка топлива до остатка (2 400 кг), как указано в исходных данных – это особый случай полета; на практике же остаток топлива после рейса составляет 3 500...4 000 кг, т. е. время работы насосов бака № 2 будет несколько меньше расчетного.

В связи с изложенным предлагается ввести приведенное время работы насосов, которое определяется как условное время работы насоса, когда его состояние будет таким же, как у насоса той же группы, установленном в баке № 1. Соотношение между $t_{\text{пп}}$ и $t_{\text{ф}}$ определяется по коэффициентам приведения R_i , т. е. для определения ресурса насоса необходимо найти время $t_{\text{пп}}$, при условии, что один из контролируемых параметров достигнет предельного состояния:

$$t'_{\text{пп}} = R_i \cdot k_i \cdot t_{\text{сам}}$$

Эксплуатация насосов баков №3 на продленных ресурсах возможна, даже если $t_{\text{пп}}$ не превышает 6 000 ч:

$$R_i \cdot k_i \leq 0,75.$$

Так как уже при этом значении $R_i \cdot k_i \cdot t_{\text{сам}} = 8\ 000$ ч.

Если же по результатам контроля параметров значения $R_i \cdot k_i$ окажутся меньше 0,75 либо $t_{\text{пп}}$ будет более 6 000 ч, то это значит, что эксплуатация на продленных ресурсах всех насосов ЭЦН-91С возможна.

A. A. Pavlenok, L. G. Shajmardanov

THE QUESTIONS OF METHODOLOGY OF INDIVIDUAL PROLONGATION OF THE CIVIL AVIATION AIRPLANES DEVICES RESOURCES

The conditions of load and work time resources of the same type devices in the systems of civil aviation airplanes are often quite different. The ability and methodology of calculation of these peculiarities and differential point of view to the resources appointment is discussed in the work.

В. А. Пожиленков, А. М. Игошин

АНАЛОГ ЭФФЕКТА ГАННА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И ЭРОЗИОННЫХ СВЕЧАХ СИСТЕМ ЗАЖИГАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Представлены результаты экспериментальных исследований работы систем зажигания со свечами поверхностного разряда, теоретические и практические выводы по результатам работ. Процессы, происходящие в таких системах зажигания, в действительности отличаются от описанных в теории.

Представленные исследования были проведены с целью поиска путей повышения эффективности систем зажигания авиационных газотурбинных двигателей.

Как известно, в данных системах применяются полупроводниковые и эрозионные свечи поверхностного разряда [1...3]. Полупроводником является двуокись титана, частично восстановленная в водороде. В эрозионных свечах на поверхность изолятора между электродами нанесены частицы металла, изолятором является синоксаль – металлические частицы из титана. Межэлектродный промежуток равен 1 мм для эрозионной и 2 мм для полупроводниковой свечи [4]. Свечи питаются напряжением 3,5...5,0 кВ, а напряжение пробоя для этих промежутков составляет 15...20 кВ. Такое низкое пробивное напряжение объясняется тем [1...3], что вначале ток протекает в полупроводнике или металлизированном слое, разогревает его, испаряет и ионизирует межэлектродный промежуток, после чего вспыхивает дуга. Но теория не объясняет перехода тока из поверхностного слоя в межэлектродное пространство, поскольку с ростом температуры проводимость этого слоя растет, так как с ростом температуры растет и подвижность носителей заряда. Иными словами, электронам энергетически выгоднее двигаться в проводящем слое, чем пробивать воздушный зазор.

Для проведения испытаний использовались экспериментальные стенды (рис. 1...3).

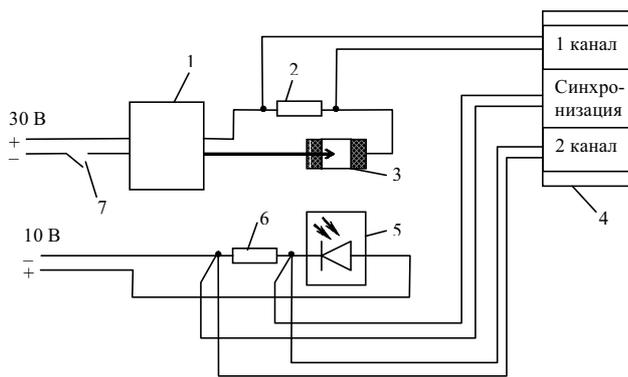


Рис. 1. Схема исследования системы зажигания:

- 1 – агрегат зажигания; 2 – сопротивление 1,7 Ом;
- 3 – свеча зажигания; 4 – двухканальный осциллограф;
- 5 – фотодиод; 6 – сопротивление 5 кОм; 7 – выключатель

Совместно с индукционной катушкой КНО-II использовалась схема понижения частоты смыкания-размыкания контактов, собранная на тиристоре КУ-202Л1 и конденсаторе К50-16 на 200 мкФ (рис. 3).

Для схемы применялись входное сопротивление $R_1 = 10$ кОм, ограничивающие напряжение сопротивления $R_2 = 5$ кОм и $R_3 = 5$ кОм.

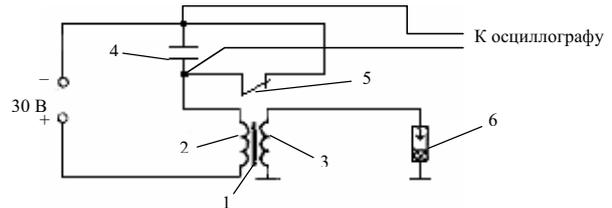


Рис. 2. Схема исследования напряжения на контактах в первичной цепи индукционной катушки: 1 – сердечник; 2 – первичная обмотка; 3 – вторичная обмотка; 4 – конденсатор; 5 – прерыватель; 6 – свеча

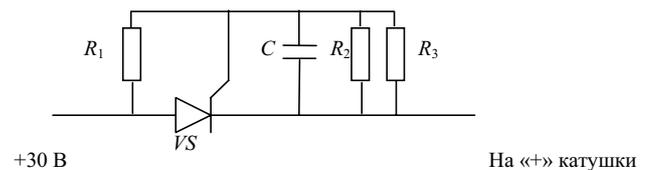


Рис. 3. Схема понижения частоты

В качестве основного измерительного прибора применен осциллограф С1-55. Для получения постоянного напряжения 10 В использовался источник питания постоянного тока Б5-47. Для получения постоянного напряжения 30 В применялся блок питания на 30 В.

При исследованиях в разрыв экрана проводки свечи вставлялся шунт, напряжение с которого подавалось на первый вход осциллографа. На второй вход подавалось напряжение, пропорциональное току, проходящему через фотодиод, установленный напротив центрального электрода свечи. Таким образом, были получены осциллограммы тока разряда и изменения яркости дуги (рис. 4).

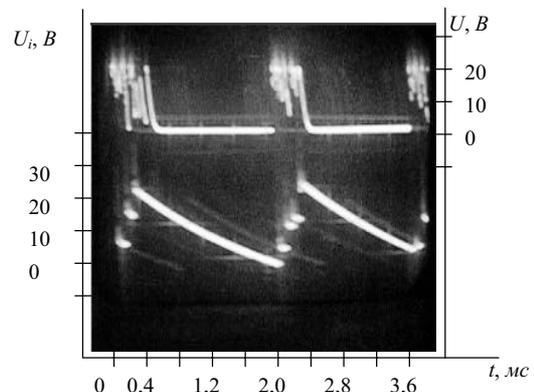


Рис. 4. Ток разряда (верхняя осциллограмма) и яркость дуги (нижняя осциллограмма)

Результаты экспериментов показали их большие отличия от теории. В эксперименте ток возрастает ступенчато, в начале каждой ступеньки происходит вспышка, во время которой происходят высокочастотные колебания (рис. 5). При этом идет непрерывное падение напряжения. Исходя из этих наблюдений можно сделать вывод, что межэлектродный проводящий слой в свече имеет падающий участок вольт-амперной характеристики. При наличии такого участка в полупроводниках происходит образование домена – участка, в котором отсутствуют быстрые носители зарядов. Это явление соответствует эффекту Ганна в полупроводниках [5].

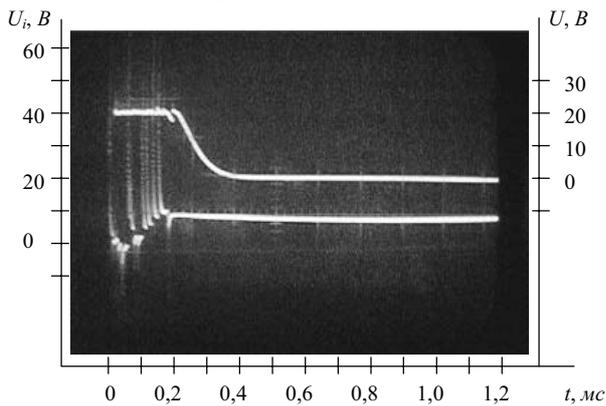


Рис. 5. Ток разряда (нижняя осциллограмма) и яркость дуги (верхняя осциллограмма)

Механизм разряда в эрозионных свечах можно представить следующим образом. В начале слой, в который внедрены частицы металла, не проводит электрического тока. По мере роста напряжения начинается движение зарядов вследствие туннельного эффекта. Когда напряжение превысит критическое для эффекта Ганна значение, в слое образуется домен, к которому прикладывается почти все напряжение. Размеры домена невелики (меньше 0,1 мм), и напряжения вполне хватает для пробоя воздушного промежутка над ним. Поскольку напряжение на свечу подается через разрядник, в начале разряда оно намного больше критического, т. е. разряд начинается с нижней точки падающего участка вольт-амперной характеристики. Процесс повторяется несколько раз, каждый раз при более низком напряжении, до тех пор, пока напряжение не станет ниже критического. Затем разряд идет в поверхностном слое без пробоя. В полупроводниковых свечах процесс протекает аналогично,

только в самом начале происходит скачок тока без образования дуги, который убирает быстрые носители зарядов.

Зажигание топливовоздушной смеси осуществляется только во время горения дуги, которая составляет не более 5 % от цикла разряда. Чем больше время разряда, тем большая зона горения образуется, тем больше вероятность того, что эта зона горения станет самоподдерживающейся. Связано это с тем, что потери тепла пропорциональны квадрату радиуса зоны, а количество тепла в ней пропорционально кубу радиуса. Радиус пропорционален времени горения дуги и скорости движения фронта горения. Большая по размерам зона содержит больше теплоты, теряет ее меньше, ее объем растет быстрее.

В заключение сделаем следующие выводы:

1. Для повышения эффективности необходимо увеличить время горения дуги. Для этого на свечу необходимо подать напряжение выше критического и поддерживать его все время, необходимое для зажигания топливовоздушной смеси.
2. Полупроводниковые свечи имеют малую эффективность, так как они используют значительную часть энергии разряда для нагрева полупроводника.
3. Рассмотренное авторами явление названо аналогом эффекта Ганна, поскольку в металлизированном изоляторе нет второй зоны проводимости, а эффект Ганна, как известно, возникает в двухзонных полупроводниках [5].

Библиографический список

1. Электрооборудование воздушных судов: учеб. для вузов / С. А. Решетов, С. П. Кононов, Н. В. Максимов и др.; под ред. С. А. Решетова. М.: Транспорт, 1991. 319 с.
2. Варшавский, А. С. Авиационный электропривод / А. С. Варшавский, А. Д. Николаев, Ш. Б. Полонский, В. М. Яковлев. М.: Воен. изд-во М-ва обороны СССР, 1962.
3. Алабин, М. А. Запуск авиационных газотурбинных двигателей / М. А. Алабин, Б. М. Кац, Ю. А. Литвинов. М.: Машиностроение, 1968. 228 с.
4. Скуридин, А. А. Авиационные запальные свечи для поршневых и реактивных двигателей / А. А. Скуридин. М., 1958. 96 с.
5. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 352 с.

V. A. Pozhilenkov, A. M. Igoshin

ANALOG OF THE GANN'S EFFECT IN SEMICONDUCTOR AND EROSION CANDLES OF THE SYSTEMS OF IGNITION OF AVIATION GAS TURBINE ENGINES

This article shows experimental research results of used surface discharge plugs ignition systems activity; also, the article shows theoretical and practical conclusions from these results. The article tells about real processes in such ignition systems differ from processes described in theory.

В. А. Пожиленков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗБЕГА ТЯЖЕЛОГО ТРАНСПОРТНОГО САМОЛЕТА С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗЛЕТНОЙ МАССЫ И ТЯГИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ДАННЫМ БОРТОВОГО САМОПИСЦА

Представлены результаты работ по определению взлетной массы и тяги двигателей воздушного судна в процессе разбега по данным бортового самописца, фиксирующего воздушную скорость. Описаны математические методы, применяемые в процессе идентификации. Дана оценка точности этих методов.

Разработка методов определения взлетной массы воздушного судна (ВС) по данным бортового самописца параметров полета производилась в целях повышения безопасности полетов (БП). Наиболее полно эта проблема отражена в работах М. С. Кубланова [1].

В конце 90-х гг. в России было отмечено несколько летних происшествий, связанных с перегрузкой ВС. Даже приближенные методы показывали фактическую взлетную массу, превышающую не только указанную в сопроводительной документации, но и максимально допустимую. Работы [2...4] позволили достаточно точно определять взлетную массу. Полученная точность (порядка 3,5 %) и сплошная, а не выборочная, обработка записей самописцев сняли прямую угрозу безопасности полетов. К сожалению, после этого резко снизилось финансирование исследований в данном направлении. И в настоящее время работы по данной тематике ведут отдельные энтузиасты [1].

Однако эта тема далеко не исчерпана. Актуальность ее заключается в том, что информация о массе и других параметрах, определяющих поведение ВС на разбеге, необходима экипажу перед полетом и непосредственно в процессе разбега и отрыва. Эти параметры включают, помимо массы, тягу двигателей, коэффициент лобового сопротивления и т. д. Которые даже у для однотипных ВС строго индивидуальны. Например, суммарная статическая тяга двигателей для Ил-76ТД может отличаться почти на 2 т, а это увеличивает длину разбега почти на 200 м. Неточность определения массы в 6 т (около 3 % максимального взлетного веса) изменит длину разбега также на 200 м. Поэтому необходим постоянный мониторинг состояния всех ВС с выдачей экипажам номограмм для предварительного расчета длины разбега и введение индивидуальных параметров ВС в бортовой вычислитель, который уже в процессе разбега уточнит массу. Затем вычислитель выдаст уточненные скорости принятия решения, подъема передней ноги и отрыва, а также взлетную дистанцию или сообщит, что взлет невозможен. Подобная работа вычислителя предусмотрена на самолете Ту-204, однако там параметры одинаковы для всех самолетов, а масса определяется по давлению в амортистойках (точность 3...4 % при штиле), поэтому эта система до сих пор не используется.

Для уточнения массы ВС в процессе разбега, причем в самом его начале, необходимы точные данные о параметрах ВС. Получить эти данные можно при постоянной обработке полетной информации по каждому ВС, а для этого нужна соответствующая методика, которая и рассматривается в данной статье.

Создание математических моделей (ММ) динамики полета позволяет извлекать из полетных данных (ПД) информацию, содержащуюся в них в неявном виде, в частности фактическую взлетную массу. Работы по данной тематике были проведены несколькими организациями [1; 4], и по имеющимся сведениям достигнута точность определения взлетной массы 3,5 %. Как указано в работе [1], за рубежом также ведутся аналогичные исследования, но сведения по ним являются закрытыми. Таким же образом обстоят дела и в отечественной авиационной науке.

Работы [2; 3] построены на основе минимизации разности между ММ и ПД, при этом ПД подвергаются существенному преобразованию с целью сглаживания, после чего в ММ вводятся вычисленные значения производных. В работе [2] отдельная глава посвящена численному дифференцированию. Если учесть, что ММ построена на линеаризованных дифференциальных уравнениях, а вычисление производных является неоднозначным процессом, то можно считать, что данные методы не обладают требуемой точностью.

Более точная методика дана в [4], где уравнение движения самолета на разбеге решается относительно массы в каждой точке замера скорости:

$$m = \frac{[T_0 - K_t \cdot (K_y V^2) + K_d V - K_x V^2]}{K_t \cdot g + dV / dt}.$$

Эта методика позволяет вычислить константу, соответствующую массе самолета, но требует точного знания взлетной тяги и других параметров разбега. При этом необходимо определить ускорение самолета. В данной работе ускорение рассчитывается как квадратичная функция времени, что весьма не очевидно. Приведенная методика вызывает вполне обоснованные сомнения в заявленных значениях точности, но ее преимущество заключается в том, что не производится численного интегрирования уравнения движения ВС, соответственно снимается вопрос об устойчивости решения.

Задачей данного исследования является не только повышение точности определения массы, но и определение других параметров самолета, влияющих на процесс разбега.

Объектом исследований стал самолет Ил-76ТД. Носитель информации – самописец МСРП-64. Потребляемая информация – приборная скорость на этапе разбега от 100 км/час и до начала подъема передней стойки шасси (определялось по росту угла тангажа). Как известно, на Ил-76 приборная скорость записывается по двум каналам (при наличии системы воздушных сигналов СВС-72)

– от собственного датчика МСРП и от указанной системы. Исследования показали, что второй канал предпочтительней.

Для обработки информации разработан метод многократного отображения (преобразования) функции скорости $V(t)$ в ту же функцию. Преобразование аналогично методу численного интегрирования по Эйлера (может быть выбран и другой, например метод Рунге–Кутты), но вычисления производной выполняются по уравнению разбега

$$dV/dt = F(V),$$

где значения скорости взяты из предыдущей итерации, а при первом преобразовании – из записей МСРП. Иными словами, решение уже имеется: на первом этапе это ПД, которые используются для вычисления производной. Производная подставляется в формулу вычисления следующего значения функции. Таким образом, полученная функция не влияет на производную.

В этом и состоит главный смысл данного метода – самим уравнением задан закон вычисления производной. Случай, безусловно, частный, но его нельзя не использовать. Кроме того, в данном уравнении скорость и производная находятся в противофазе: чем больше скорость, тем меньше ускорение и, наоборот, соответственно погрешности сами себя сглаживают. Это означает, что нет необходимости в сглаживании, с которым связана потеря информации.

При таком преобразовании разорвана обратная связь между решением и процессом интегрирования, поэтому процесс устойчив по крайней мере до тех пор, пока параметры модели не выходят за разумные пределы. Неустойчив в данном случае может быть процесс в целом: решения в каждой итерации могут приближаться к решению не по кратчайшему расстоянию.

При многократном преобразовании каждая точка дискретной функции $V(t)$ перемещается к неподвижной точке, которая, по определению, лежит на решении уравнения. Этот процесс может носить как апериодический, так и колебательный характер, в зависимости от отклонения параметров модели от параметров объекта.

В работе [5] приведено доказательство теоремы, согласно которой при многократном сжимающем отображении и при наличии неподвижной точки исходная точка неограниченно приближается к неподвижной. Там же доказывается теорема Брауэра о наличии неподвижной точки, если функция преобразования непрерывна.

Поскольку преобразование, описываемое уравнением разбега, является и непрерывным, и сжимающим, что легко доказать по структуре уравнения, процесс преобразования на каждом шаге устойчив, а при каждом следующем шаге происходит приближение исходной зависимости к решению уравнения. При этом нас интересует именно пройденный путь, а точность метода влияет на него достаточно слабо. Поэтому можно применить самый простой из методов – метод Эйлера. Как показывают прогоны модели, на результатах расчетов это не сказывается, т. е. при каждом шаге (как показали исследования, их нужно не более 5) происходит движение реального процесса к модели. Варьируя каким-либо параметром модели, можно минимизировать этот долгий путь. При этом можно минимизировать как весь процесс, суммар-

ное или среднеквадратичное отклонение, так и отдельные его участки. Это позволяет уточнять параметры, вес которых изменяется в процессе разбега:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{[T_0 - K_t \cdot (mg - K_y V^2) + K_d V - K_x V^2]}{m},$$

где V – истинная воздушная скорость самолета; m – масса; T_0 – суммарная тяга двигателей при $V = 0$, с учетом температуры и давления; K_t – коэффициент трения качения; g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/сек²; K_y – обобщенный коэффициент подъемной силы; K_d – коэффициент, определяющий снижение тяги двигателей от скорости ($dT/dV < 0$); K_x – обобщенный коэффициент лобового сопротивления.

Исследования показали, что это уравнение достаточно точно описывает процесс разбега. Шумы самописца носят стационарный, случайный характер.

Истинная воздушная скорость получается из исходных ПД, за счет введения поправок на сжимаемость и плотность воздуха; инструментальные погрешности самописца компенсируются при дешифровке записи. Начальное значение тяги в соответствии с данными двигателя Д30-КП составляет 48 000 кгс; коэффициент трения выбран 0,022; остальные коэффициенты определены по данным двигателя и самолета. Исследования производились по данным трех самолетов, которые осуществили по 20 и более полетов каждый.

Вначале, варьируя массой модели в каждом полете, добивались минимума движения точек. Затем, задав отклонение $\pm 2,5$ %, сверяли значения полученных масс с данными в паспорте полета. Получилось нулевое совпадение: ни один полет не попал в поле допуска.

Эту же работу повторили, введя коэффициент эффективности тяги $K_t \leq 1$ и пошагово уменьшая его. При этом получился явно выраженный максимум совпадения, но для каждого самолета он свой, т. е. тяга у каждого самолета разная. В «окно» попало 73...75 % полетов. Затем, при полученной тяге, провели ту же работу, но сузили «окно» до $\pm 1,5$ %. Точка максимума несколько сдвинулась. По полетам, которые вышли в первый максимум, выявилось превышение расчетной массы на 2...3 т. Отклонение было ожидаемое (массу колес необходимо умножить на 1,5 для учета раскрутки). В итоге было получено уточнение силы тяги двигателей.

Далее обрабатывались текущие данные. В результате удалось заметить изменение тяги, связанное со сменой двигателя. Тяга увеличилась приблизительно на 400 кгс.

В качестве примера приведем графические изображения итерационных процессов, соответствующих одному разбегу для моделей с различной массой (рис. 1...3). В нижней части каждого рисунка приведен график разности скорости между первой и последней итерацией, по которому можно оценить степень приближения модели к реальности.

Проанализировав данные (см. рис. 1), можно сделать следующие выводы:

- масса самолета превосходит массу модели: итерационные решения (линии 2, 3) лежат выше данных самописца (линия 1);
- превышение значительное – итерационный процесс носит колебательный характер: первая итерация (линия 2)

отстоит от исходных данных (линия 1) дальше, чем последующие итерации (пучок 3);

– по линии разности (4) видно, что у объекта и модели не совпадает параметр, имеющий постоянный вес в процессе разбега, масса самолета.

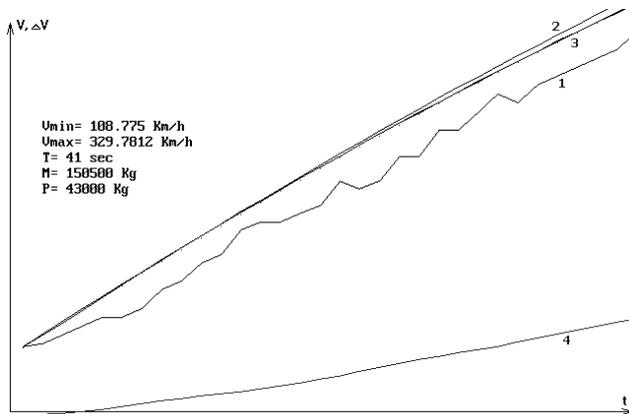


Рис. 1. Итерационный процесс для модели с массой $M = 150,5$ т и тягой $P = 43$ т: 1 – исходные данные; 2 – первая итерация; 3 – последняя итерация; 4 – разность между 1-й и последней 5-й итерацией

Параметры со снижающимся весом и суммарной взлетной тяги двигателей также не совпадают (см. рис. 2).

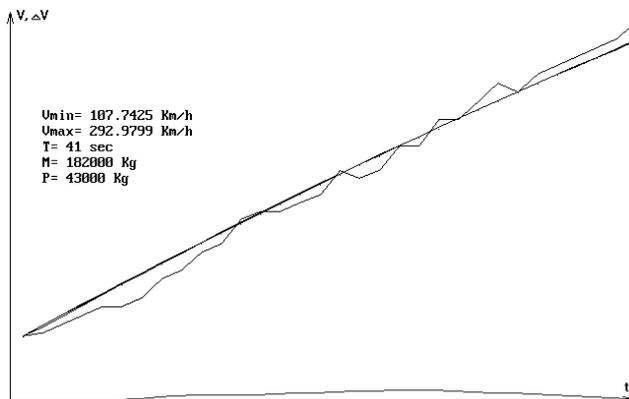


Рис. 2. Итерационный процесс для модели с массой $M = 182$ т и тягой $P = 43$ т

К параметрам с неизменным весом можно отнести только массу самолета и коэффициент снижения тяги двигателей. Суммарная взлетная тяга уменьшает вес по мере роста аэродинамических сил. Вес аэродинамических коэффициентов растет в процессе разбега, а вес коэффициента трения снижается из-за возрастания подъемной силы. Разность возрастает в начале разбега, а с середины нарастание прекращается (см. рис. 2).

Кривая разности между первой и последней итерациями дает информацию не за счет абсолютных значений разностей, а за счет наклонов и перегибов. В форме и положении линии разностей и проявляется адекватность модели (см. комментарии к рисункам).

По виду кривой разности между первой и последней итерациями можно судить о соответствии параметров модели реальному ВС. Необходимо отметить, что кривая 4 должна быть как можно ближе к горизонтальной прямой. В этом случае отклонение линии разности от

нуля равно произвольной постоянной интегрирования и зависит только от начального отклонения скорости. В работе [5] указывается, что при данном конформном отображении первая точка всегда не конформна. Поэтому каждую следующую итерацию можно начинать не с начальной точки, а со следующей, но это ведет к потере ценной информации, поскольку ускорение будет максимальным на начальном этапе разбега. Для того чтобы не потерять информацию, применено варьирование начальной скоростью в пределах погрешности самописца, что позволяет получить нулевое расхождение на начальном этапе. Итерации практически накладываются одна на другую (см. рис. 2), что говорит о хорошем совпадении параметров модели и самолета. По этой модели можно вести уточнение аэродинамических коэффициентов и тяги двигателей. Соответствующая методика разработана и опробована, процесс обработки ПД автоматизирован. Хорошее приближение получается после обработки 10...12 полетов. Поскольку параметры ВС непрерывно изменяются, необходима постоянная обработка полетной информации с созданием базы данных по каждому ВС.

График работы модели с завышенной массой, где все итерации проходят ниже исходной линии, приведен на рис. 3.

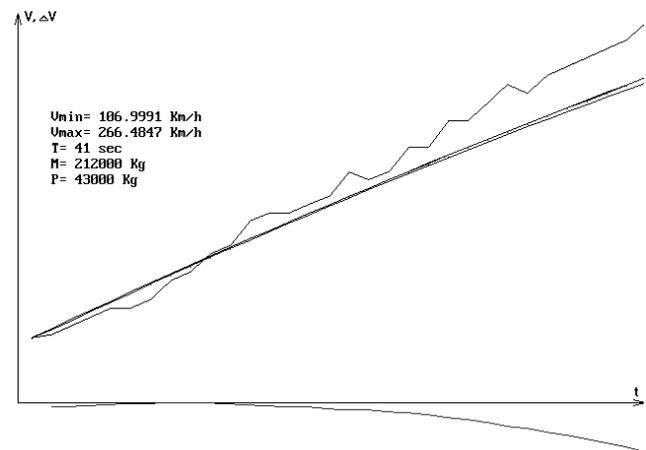


Рис. 3. Итерационный процесс для модели с массой $M = 212$ т и тягой $P = 43$ т

Таким образом, сделаем следующие выводы:

1. Данная методика позволяет определять взлетную массу с точностью 1,5...2,0 %, причем точность со временем повышается. Для этого необходима постоянная обработка полетной информации с целью уточнения тяги и аэродинамических характеристик. Наблюдение за тягой двигателей поможет информировать о техническом состоянии самолета.

2. Полетную информацию при взлете в тяжелых метеоусловиях, повышенной влажности, давлении и низких температурах на аэродроме вылета для уточнения параметров ВС по возможности не используют.

3. Разрабатываемые приборы и методики, определяющие рубежи и параметры разбега, должны учитывать индивидуальные данные самолета. В процессе эксплуатации уменьшается тяга двигателей, увеличивается вес ВС, ухудшаются его аэродинамические характеристики.

4. Представленный способ интегрирования позволяет получать не только собственные значения уравнения, но и его точные (в соответствии с примененным методом численного интегрирования) решения, если имеются приближенные. Как показали эксперименты с уравнениями первого и второго порядка, за исходные данные можно взять случайные числа. Устойчивость решения обеспечена независимо от применяемой схемы интегрирования, поскольку величина производной не зависит от значения искомой функции. Проверена устойчивость для уравнений вида $dY/dt = f(y)$, соответствующих уравнению разбега, а также для уравнений второго порядка, описывающих гармонические колебания с затуханием и без него. Но перспективен только один вид уравнений.

Библиографический список

1. Кубланов, М. С. Разработка теории и методов повышения уровня адекватности математических моделей на

основе идентификации параметров движения для обеспечения летной эксплуатации самолетов ГА / М. С. Кубланов; МГТУ ГА. М., 2000.

2. Сакач, Р. В. Использование средств объективного контроля в целях обеспечения безопасности полетов / Р. В. Сакач и др. М.: Изд-во МИИГА, 1988.

3. Харманкулов, И. В. Эффективность использования полетной информации / И. В. Харманкулов, Б. В. Зубков. М.: Транспорт, 1991.

4. Макаров, Н. В. Функциональный анализ влияния ошибок входной информации на погрешность расчета фактической массы воздушного судна по расшифровкам записей на МСРП приборной скорости разбега в зависимости от времени: техн. справка / Н. В. Макаров. М.: ГОСНИИГА, 1997.

5. Ортега, Дж. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными / Дж. Ортега, В. Рейнболт. М.: Мир, 1973.

6. Бехтир, П. Т. Практическая аэродинамика самолета ИЛ-76Т / П. Т. Бехтир, В. П. Бехтир. М.: Машиностроение, 1979.

V. A. Pozhilenkov

MODELLING OF THE PROCESS OF THE TAKE-OFF RUN HEAVY TRANSPORT AIRPLANE WITH PURPOSE THE DEFINITIONS OF TAKE-OFF MASS AND THE TRACTION OF ENGINES BY ONBOARD SELF-RECORDER UNIT DATA

This article presents activities results on aircraft take-off weight and engine thrust determination at the take-off run by onboard self-recorder unit data. Mathematical methods applied at the identification process are described. These methods precision value is given.

А. В. Пугач, Т. И. Соловьева, А. К. Шатров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассматривается актуальная в настоящее время проблема анализа реакции конструкции космических аппаратов при акустическом воздействии участка выведения. Предложенный подход позволяет достаточно корректно оценивать уровни нагружения для конструкций космических аппаратов при прогнозировании их динамической реакции на рассматриваемый тип воздействий.

При запуске ракеты-носителя (РН) конструкция космического аппарата (КА) подвергается большим механическим нагрузкам, которые передаются на космический аппарат через интерфейс с РН в виде интерфейсных ускорений, а также в виде непосредственного акустического шума, обусловленного работой двигательной установки ракеты-носителя. Интерфейсные ускорения представляют собой низкочастотные синусоидальные и случайные вибрации по всем направлениям. Вибронагружение КА определяется акустическим воздействием при старте РН и на атмосферной части участка выведения. При старте РН двигательная установка является источником интенсивного акустического давления и механической вибрации широкого диапазона частот, которые генерируют широкополосную случайную вибрацию конструкции КА и акустическое давление на его поверхности и внутри отсеков [1; 2].

Отклик на случайное возбуждение. Уравнения движения системы со многими степенями свободы под действием внешней силы имеют следующий вид:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\}, \quad (1)$$

где $[M]$ – симметричная матрица масс размерностью $n \times n$; $[C]$ – симметричная матрица демпфирования; $[K]$ – симметричная матрица жесткости; $F(t)$ – внешняя сила; $\{x\}$ – вектор перемещений.

Приведенную систему уравнений (1) приведем к следующему виду:

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = F_i(t), \quad (2)$$

где ξ_i – доля критического демпфирования i -го тона колебаний; ω_i – частота собственных колебаний i -го тона, рад/с; $\{q\}$ – вектор модальных координат; f – частота собственных колебаний i -го тона, Гц;

$$\{x\} = [M]^{-1/2}[\Phi]\{q\} = [u]\{q\}, \quad (3)$$

$$[u] = [M]^{-1/2}[\Phi].$$

Пусть $F_i(f) = \int_{-\infty}^{\infty} F_i(t)e^{-i2\pi ft} dt$ и $Q_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} q_i(t)e^{-i2\pi ft} dt$ – преобразование Фурье $F_i(t)$ и $q_i(t)$ соответственно. Применив преобразование Фурье к обеим частям уравнений (2), получаем

$$Q_i(f) = H_i(f)F_i(f), \quad (4)$$

где

$$H_i(f) = \frac{1}{f_i^2 - f^2 + 2i\xi_i f_i f} \cdot \frac{1}{4\pi^2} \quad (5)$$

является комплексным откликом на частоте i -го тона колебаний.

По уравнению (3) следует, что отклик конструкции в r -й точке может быть записан как

$$x_r = \sum_{i=1}^n u_r^i q_i(t), \quad (6)$$

где u_r^i является элементом матрицы $[u]$ в r -й строке и i -м столбце. Используя преобразование Фурье, уравнение (6) можно переписать в виде

$$X_r(f) = \sum_{i=1}^n u_r^i Q_i(f) = \sum_{i=1}^n u_r^i H_i(f) F_i(f). \quad (7)$$

Согласно (7) спектральная плотность мощности отклика S_{xr} будет задана выражением

$$S_{xr}(f) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_r^i u_r^j H_i^*(f) H_j(f) S_{Fij}(f), \quad (8)$$

где S_{Fij} является спектральной плотностью возбуждения $F_i(t)$ и $F_j(t)$.

Среднеквадратичное значение отклика x_r , Ψ_{xr} имеет вид

$$\Psi_{xr} = \int_0^{\infty} S_{xr}(f) df = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_r^i u_r^j \int_0^{\infty} H_i^*(f) H_j(f) S_{Fij}(f) df. \quad (9)$$

Если предположить, что на КА действует возбуждение основания, т. е. $F_i = P_i F(t)$, то уравнение (9) можно переписать как

$$\bar{x}_r^2 = \Psi_{xr} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j u_r^i u_r^j \int_0^{\infty} H_i^*(f) H_j(f) S_F(f) df, \quad (10)$$

где S_F является спектральной плотностью мощности от $F(t)$.

Акустическое давление. Обычно акустическое возбуждение задается в уровнях звукового давления в октавной полосе частот. Уровень звукового давления для каждой октавной полосы указывается в децибеллах:

$$L = 20 \log \frac{P}{P_0} = P_0 10^{L/20}, \quad (11)$$

где L – уровень звукового давления, дБ; P – уровень звукового давления; P_0 – базовый уровень давления, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Н/м².

Пусть P – уровень звукового давления для полосы частот $f_{i-1} < f_{ci} \leq f_i$ с центральной частотой f_{ci} . Для октавного диапазона, для 1/3-октавного диапазона и для 1/ n -октавного диапазона $f_i = 2f_{i-1}$, $f_i = 2^{1/3}f_{i-1}$ и $f_i = 2^{1/n}f_{i-1}$ соответственно. Центральная частота f_{ci} определяется по выражению $f_{ci} = \sqrt{f_i f_{i-1}}$.

Если S – средняя спектральная плотность мощности для одно-октавного частотного диапазона $f/\sqrt{2}$ и $\sqrt{2}f$, то среднеквадратичное значение звукового давления P для этого диапазона

$$P = \sqrt{S \left(\sqrt{2}f - \frac{f}{\sqrt{2}} \right)} = \sqrt{\frac{Sf}{\sqrt{2}}}. \quad (12)$$

Согласно звуковому давлению спектральная плотность мощности может быть описана формулой

$$S = \frac{\sqrt{2}}{f} P^2. \quad (13)$$

Подставляя уравнение (11) в уравнение (13), получим

$$S = \frac{\sqrt{2}}{f} P_0^2 \cdot 10^{L/10} \quad (14)$$

По уравнению (14) следует, что уровни звукового давления преобразуются в спектральную плотность мощности звукового давления. Зная спектральную плотность мощности, можно провести анализ отклика на случайное воздействие, описанный выше, ценный для анализа реакции конструкции космических аппаратов при акустическом возбуждении.

Акустический анализ. В настоящее время развитие науки и техники позволяет продуктивно использовать комплексный подход к анализу динамического поведения спутника, включающий как испытания, так и проведение расчетов. В последнее время особое значение приобретает разработка математической модели спутника, адекватно описывающей его механические свойства, что возможно в сочетании с экспериментом и методами идентификации параметров конструкции.

Для обеспечения максимально точного и подробного описания упругих характеристик конструкции и получения прогнозов используется расчетная модель, построенная на основании метода конечных элементов.

При проектировании КА важным этапом являются виброакустические испытания спутников, которые проводятся для выявления скрытых дефектов сборки и монтажа оборудования, чувствительного к вибрационному нагружению, а также для того, чтобы показать, что спутник способен выдержать нагрузки при старте ракеты-носителя.

Целью данной работы является получение на основе конечно-элементной модели (КЭМ) КА откликов ускорений при акустическом возбуждении и их сравнение с результатами акустических испытаний. Для исследования поведения конструкции КА при акустическом нагружении по конечно-элементной модели КА (рис. 1) использовался программный комплекс NASTRAN.

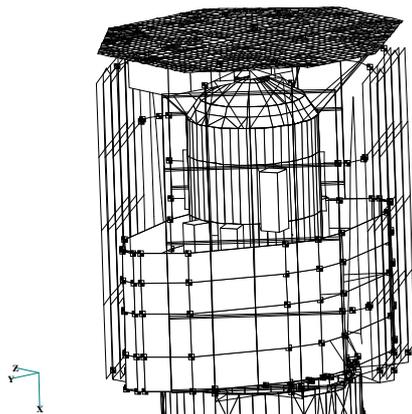


Рис. 1. Конечно-элементная модель КА

Акустическое воздействие как случайная функция задается в диапазоне частот 20...2 000 Гц. При этом акустическое возбуждение на старте принимают за квалификационный уровень нагружения конструкции КА при проведении анализа реакции КА при акустических испытаниях и расчетах (см. таблицу). Конечно-элементный анализ отклика на случайное воздействие позволяет оценить отклики ускорений в узлах КЭМ КА, где в качестве функ-

ции случайного возбуждения задано среднеквадратическое значение звукового давления P .

Акустическое воздействие

Центр полосы октавы, Частота, Гц	Квалификационный уровень (относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па), дБ
31,5	130
63	133
125	139
250	141
500	140
1000	137
2000	130
4000	123
Полный среднеквадратический уровень, дБ	146

Акустическое давление прикладывалось ко всем плоским элементам конструкции по нормали к поверхности (рис. 2). Значение добротности Q при расчетах принималось равным 25.

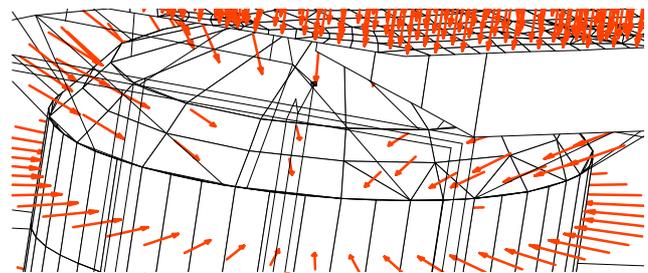


Рис. 2. Акустическое давление

При проведении акустического анализа отклики ускорений были получены в узлах КЭМ КА, соответствующих местам установки датчиков при проведении акустических испытаний (рис. 3, 4).

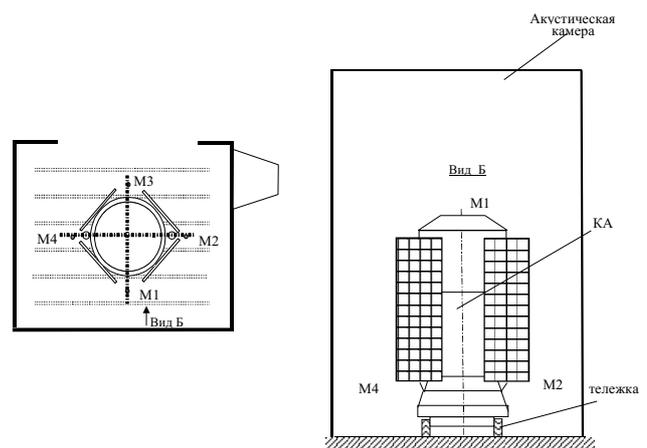


Рис. 3. Схема акустических испытаний КА

Отклики ускорений по направлениям осей КА в характерных точках конструкции при акустическом возбуждении – в диапазоне частот до 300 Гц – хорошо согласуются с результатами акустических испытаний КА (рис. 5...7). Кроме того, как показал анализ полученных результатов, на основе КЭМ КА можно легко прогнози-

ровать уровни нагружения конструкции КА при проведении акустических испытаний.



Рис. 4. Акустическая реверберационная камера РК-660



Рис. 5. Отклики ускорений при акустическом возбуждении (ось Ox КА)



Рис. 6. Отклики ускорений при акустическом возбуждении (ось Oy КА)

Проблема исследования поведения конструкции космического аппарата на акустическое воздействие в настоящее время продолжает оставаться актуальной, так как в задачи проектирования и отработки конструкций КА входят вопросы оценки прочности конструкции КА и прогнозирования нагружения бортового оборудования и аппаратуры, испытывающих такие воздействия. Предложенный выше подход на основе конечно-элементной модели КА позволяет на этапе проектирования дать достаточно надежную оценку уровней акустического нагружения спутника в целом и акустически чувствительного оборудования, поскольку полученные расчетным путем результаты акустического нагружения достаточно хорошо коррелируются с результатами испытаний.



Рис. 7. Отклики ускорений при акустическом возбуждении (ось Oz КА)

Библиографический список

1. Гладкий, В. Ф. Динамика конструкции летательного аппарат / В. Ф. Гладкий. М.: Наука, 1969.
2. Козлов, Д. И. Конструирование автоматических космических аппаратов / Д. И. Козлов, Г. П. Аншаков, В. Ф. Агарков. М.: Машиностроение, 1996.

A. V. Pugach, T. I. Solovjeva, A. K. Shatrov

DYNAMIC BEHAVIOUR RESEARCH OF THE SPACE CRAFT STRUCTURE AT VIBROACOUSTIC LOADING

In this article it is studied the actual problem of the spacecraft structure response analysis at acoustic excitation. The used approach allows to define the correct estimation of load levels for Spacecraft structures at dynamic responses prediction at acoustic excitation.

В. И. Сливинский, Г. В. Ткаченко, М. В. Сливинский

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Обоснована эффективность применения сотовых заполнителей и сотовых конструкций в изделиях ракетно-космической техники. Показаны примеры создания современных сотовых конструкций для летательных аппаратов. Описаны новые возможности создания рациональных сотовых конструкций.

В настоящее время сотовые трехслойные конструкции широко применяются в ответственных агрегатах летательных аппаратов (ЛА) всех классов: пассажирских и военных самолетах, вертолетах, двигателях летательных аппаратов, ракетах различных типов, космических аппаратах (КА) [1]. Столь широкое использование этих конструктивно-технологических решений связано с высокой эффективностью сотовых заполнителей (СЗ) и конструкций [2...6].

Подтверждением этому служат высокие разрушающие напряжения сотовых конструкций (СК) по сравнению с другими при продольном сжатии (рис. 1), сдвиге (рис. 2), высокая усталостная прочность при изгибе (рис. 3, 4), долговечность трехслойных панелей при воздействии переменных нагрузок (рис. 5), низкая поверхностная масса в широком диапазоне погонных сжимающих нагрузок при сжатии (рис. 6).

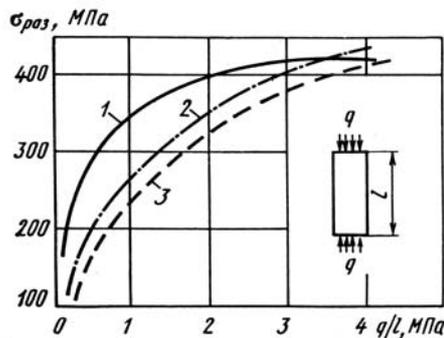


Рис. 1. Зависимость разрушающих напряжений при продольном сжатии от коэффициента напряженности различных конструкций [5]: 1 – панель с сотовым заполнителем; 2 – панель монолитная; 3 – панель стрингерная клепаная

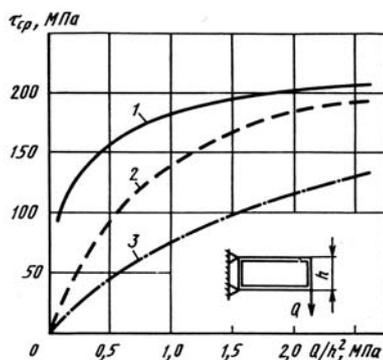


Рис. 2. Сравнительная эффективность работающих на срез стенок различных конструкций [5]: 1 – конструкция с сотовым заполнителем; 2 – конструкция стрингерная; 3 – конструкция без подкрепления

Сотовые конструкции обладают рядом специфических свойств: акустической стойкостью (рис. 7), повышенной теплопроводностью (рис. 8), имеют низкую массу при использовании в качестве теплоизоляции гиперзвуковых ЛА (рис. 9), обладают повышенной звукоизолирующей способностью (рис. 10), длительной акустической стойкостью (рис. 11) и многими другими уникальными свойствами.

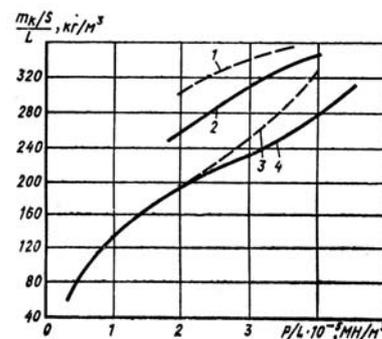


Рис. 3. Сравнение удельной массы паяных сотовых панелей с панелями других конструкций при изгибе [6]:

1 – трехслойная панель с гофрированным заполнителем с несущими слоями из стали ВНС-2, $\sigma_T > 1\,250$ МПа; 2 – стрингерная панель с обшивкой из стали ВНС-2, $\sigma_T > 1\,250$ МПа; 3 – трехслойная панель с сотовым заполнителем и несущими слоями из стали СН-4, $\sigma_B = (1\,300 \pm 100)$ МПа; 4 – то же, $\sigma_B = (1\,600 \pm 100)$ МПа

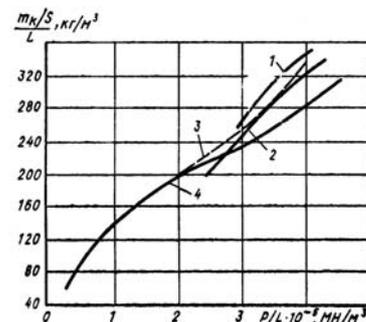


Рис. 4. Сравнение удельной массы стальных сотовых панелей и титановых конструкций при изгибе при 20 °С [6]:

1 – трехслойная панель с гофрированным заполнителем с несущими слоями из титана ОТ-4, $\sigma_B = (800 \pm 10)$ МПа; 2 – стрингерная панель с обшивкой из титана ОТ-4, $\sigma_B = (800 \pm 10)$ МПа; 3 – трехслойная панель с сотовым заполнителем и несущими слоями из стали СН-4, $\sigma_B = (1\,300 \pm 100)$ МПа; 4 – то же, $\sigma_B = (1\,600 \pm 100)$ МПа

Сотовые конструкции в авиации применяются уже более 50 лет. Типичными примерами эффективного ис-

пользования СК в авиационном строении являются носовые обтекатели, створки шасси и грузолоков, рулей высоты, элероны, панели пола и интерьера.

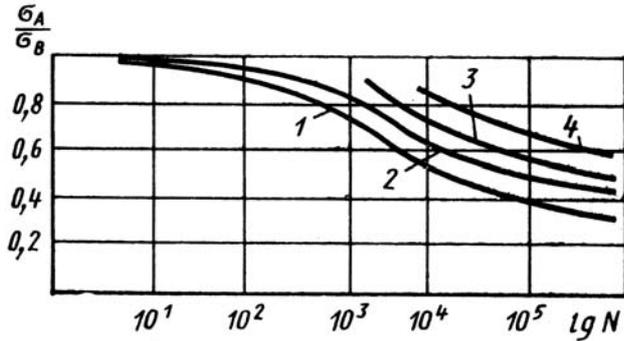


Рис. 5. Зависимость предела выносливости от числа циклов до разрушения для различных типов конструкций [6]:

- 1 – однослойного образца при растяжении – сжатии;
- 2 – трехслойного сварного образца РН 15-7М (США) при изгибе;
- 3 – трехслойного паяного образца с несущими слоями из стали СН-4 (СССР) при изгибе;
- 3 – трехслойного паяного образца РН 15-7М (США) при изгибе

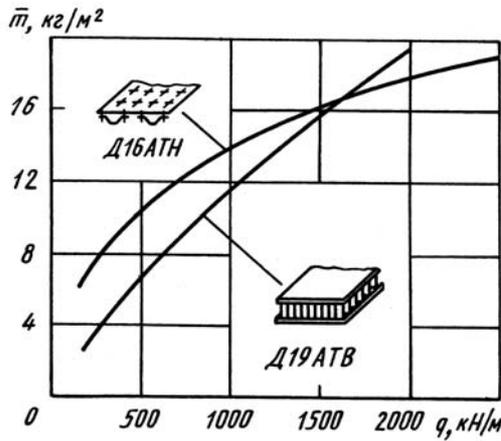


Рис. 6. Зависимость приведенной массы панелей от величины погонной нагрузки при сжатии [5]

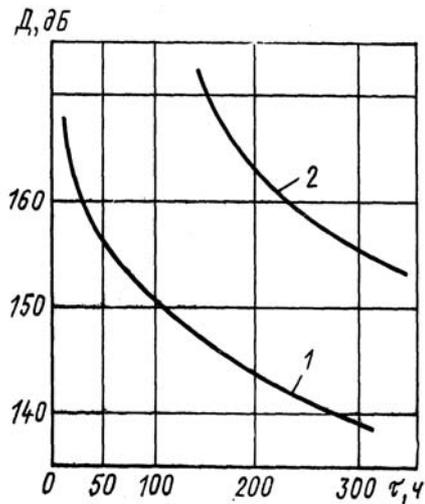


Рис. 7. Зависимость уровня звукового давления, соответствующего разрушению конструкции, от времени акустического воздействия [6]:

- 1 – стрингерная подкрепленная панель с обшивкой из стали ВНС-2;
- 2 – сотовая конструкция с несущими слоями из стали ВНС-2

В ракетно-космической технике можно выделить три направления использования СК:

- конструкционное (для головных обтекателей (ГО) ракет, переходных отсеков, гаргротов, обтекателей антенн, элементов управления крылатых ракет);
- теплозащитное и теплоизоляционное (для аэродинамических экранов, лобовых щитов, спускаемых аппаратов и др.);
- конструкциях, длительно работающих в условиях открытого космоса (антенны, панели негерметичных космических аппаратов, панели солнечных батарей (СБ), размеростабильные платформы и др.).

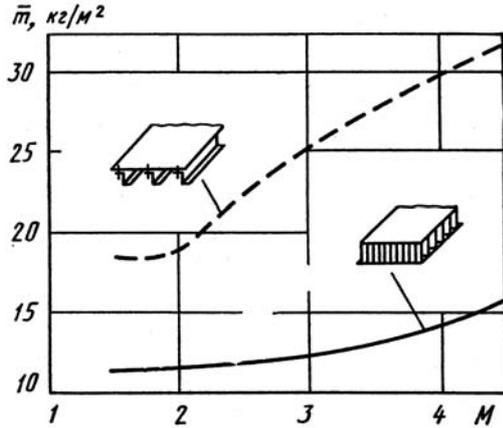


Рис. 8. Теплопроводность различных конструкций [5]:

- 1 – трехслойная панель с сотовым наполнителем (несущий слой из стали РН-15-7Мо);
- 2 – несущая панель с гофрированным наполнителем (несущие слои и наполнитель из титана Ti-Al-4V);
- 3 – стрингерная панель из титана Ti-6Al-4V

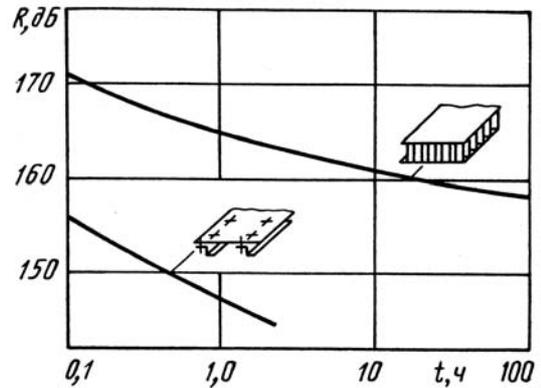


Рис. 9. Влияние применения конструкций с сотовым наполнителем на относительную массу теплоизоляции m [5]

Одним из первых предприятий, применившим СК в конструкции ракет-носителей (РН) в бывшем СССР, являлось ЦСКБ (г. Самара). Это предприятие в конце 60-х – начале 70-х гг. освоило изготовление головных обтекателей (ГО), переходных отсеков, агрегатных отсеков с обшивками и СЗ на основе стеклоткани. СК производились по интегральной технологии с соединением «мокрых» обшивок с СЗ за счет связующего [7].

В переходных отсеках, ГО, гаргротах РН класса «Протон-М», «Рокот», «Ангара» ГКНПЦ имени М. В. Хруничева широкое применение нашли трехслойные СК с углепластиковыми обшивками и сотовыми наполнителями из

алюминиевой фольги. Эти конструкции выполнили свою роль в концепции модернизации РН «Протон»:

- за счет применения новых конструкционных материалов с целью повышения энергомассовых характеристик РН;
- создания новейших конструкций и современных технологий для увеличения массы выводимых полезных грузов.

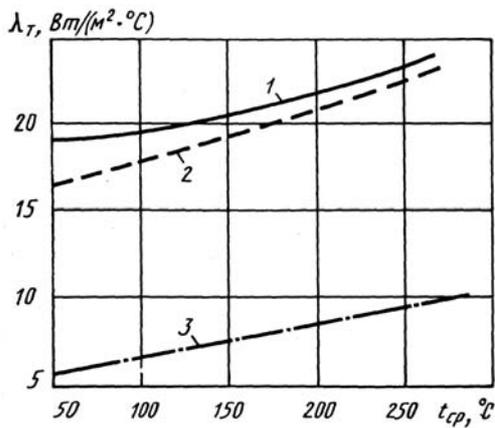


Рис. 11. Сопротивление различных конструкций при воздействии на них акустических нагрузок во времени [5]

За последние десять лет разработаны и внедрены в производстве модификации ГО ракето-носителя «Протон» диаметром от 4 100 мм до 4 350 мм и длиной от 10 до 15 м: 77КЭ (масса 16 кг/м²), 14С75 (масса 13,5 кг/м²), БКБ (масса 12,5 кг/м²), БКА (масса 11 кг/м²). Начаты работы над современным ГО диаметром 5,1 м, поверхностная масса такого изделия будет около 6 кг/м² [8].

В период с 1997 г. по настоящее время совершено более 40 успешных пусков РН «Протон-М» с головными обтекателями из сотовых конструкций.

В спускаемых аппаратах РКК «Энергия» имени С. П. Королева и НПО имени С. А. Лавочкина сотовый наполнитель из стеклоткани изолирует металлический корпус от высоких тепловых нагрузок, воспринимаемых лобовым щитом.

Примером эффективного сочетания полимерных композиционных материалов и СЗ являются панели солнечных батарей космического назначения [9; 10], которые позволили существенно уменьшить толщину выпускаемых промышленностью препрегов путем раскатки пасмы углеродных волокон до толщины в один монослой [11].

Панели СБ и панели негерметичных КА с тепловыми трубами успешно использованы в работающем на орбите КА «Ямал-100» (РКК «Энергия»).

Современным этапом совершенствования конструктивно-технологических решений и снижения массы панелей СК для КА «Ямал-200» является применение облегченного сотового наполнителя марки 5056-6,0-23П и нанесение клея ВК-36 на торцы СЗ. За счет этих мероприятий масса каркаса панелей СБ снизилась на 0,5 кг/м² и составила 1,6 кг/м².

Сотовые конструкции успешно применяются и в ГКБ «Южное». Это солнечные батареи КА «Микроспутник», панели тепло- шумоизоляции для ГО РН «Днепр», «Зенит-2М».

Современные тенденции развития ракетно-космических систем и ужесточение требований по массовым характеристикам предопределяют более широкое применение СК в новых разработках ГКБ «Южное» [12]. Так, предполагается возможность создания ГО для новых модификаций РН «Зенит» и «Циклон» на основе трехслойной СК. Предварительный расчет показывает, что массу изделий можно уменьшить до 40 % по сравнению с металлическим вариантом.

Одним из путей снижения массы КА «Микроспутник» является изготовление силовой конструкции платформы (СКП) с использованием сотовых панелей. Такое решение позволит снизить массу СКП на 30...40 % по сравнению с существующим аналогом.

ФГУП НПО ПМ имени академика М. Ф. Решетнева является наиболее динамичным предприятием, быстро осваивающим производство СК космического назначения. Оригинальная конструкция негерметичных панелей КА с жидкостными коллекторами сложной формы – это лишь одна из многих задач, которые в настоящее время успешно решает это предприятие. Для этого потребовалась мобилизация не только собственных ресурсов (организация производства СК, приобретение нового оборудования и др.), но и ужесточение требований к качеству выпускаемых СЗ, а также разработка новых видов сотовых наполнителей (только за последний два года нами для НПО ПМ разработаны десять новых типоразмеров СЗ).

Среди разработок СК этого предприятия хотелось бы выделить следующие: эллипсоидную вырезку из параболоида вращения спутника непосредственного телевизионного вещания; плиту полезной нагрузки спутника обеспечения подвижной связи; астроплату для размещения приборов системы ориентации и стабилизации; сотовую базовую плиту и приборные стойки для размещения блоков ретрансляции и антенн спутника телевизионного вещания; панели негерметичного исполнения спутника фиксированной связи и др.

Для обеспечения предприятий ракетно-космического комплекса в ОАО «УкрНИИТМ» организованно производство СЗ из различных материалов: алюминиевой фольги, полимерной бумаги «Номекс», стеклоткани, крафт-бумаги, пленки ПЭТФ, углеродной ленты. Производятся более 60 типоразмеров СЗ. Каждый из перечисленных наполнителей имеет свои специфические особенности и свою сферу применения.

Так, СЗ из фольги имеют высокие показатели удельной прочности и жесткости, а также теплопроводны.

Заполнитель из полимерной бумаги «Номекс» относится к самозатухающим материалам, он влаго- и химически стоек, радиопрозрачен. Кроме того, этот СЗ обладает уникальной способностью сохранять эксплуатационные качества без необратимых повреждений при перегрузках в локальных участках.

Сотовые наполнители на основе стеклоткани имеют хорошие теплозащитные и теплоизоляционные свойства, радиопрозрачны.

Сотовые наполнители из крафт-бумаги являются самыми дешевыми, а с помощью пропитывающих составов им можно придать свойства негорючести, влаго- и грибоустойчивости, повысить их механические характеристики.

Углесотопласт обладает максимальными абсолютными и удельными механическими характеристиками, с обшивками из углепластика он дает химически однородную и размеростабильную конструкцию.

Сотовый наполнитель на основе стеклоткани с ячейкой гибкой формы позволяет изготавливать изделия сложной геометрической формы.

Паяные СЗ из стали и титановых сплавов применяются в изделиях ракетно-космической техники, эксплуатируются до температур 450 °С. Для конструкций, нагреваемых до 1 000 °С и выше, применяются СЗ из стали, полученные сваркой [13].

С целью дальнейшего совершенствования характеристик массы ЛА разработана методика оптимизации СК с включением в параметры оптимизации геометрических и механических характеристик СЗ [1]. На примере ГО показана возможность дополнительного снижения его массы (на 10...13 %) за счет использования эксклюзивного СЗ.

В последнее время возникла необходимость в разработке суперлегких (массой < 1 кг/м²) сотовых панелей (панели СБ и панели теплоизоляции внутриобтекательного пространства). Применение серийно выпускаемых пленочных клеев массой 280...300 г/м² в таких конструкциях не оправдано, так как относительная масса клеев в СК при этом достигает 55...70 %.

Разработана и освоена технология адресного нанесения клея на торцы ячеек СЗ, позволяющая регулировать массу клея от 20 до 120 г/м² при одностороннем его нанесении [14].

Применение всех вышеперечисленных возможностей позволяет совершенствовать характеристики массы ЛА. Опыт показывает, что при замене монолитных или подкрепленных конструкций на сотовые достигается снижение массы на 25...40 %, а новые возможности создания рациональных СК позволяют повысить этот показатель до 45...55 %.

Достигнутый и перспективный уровень массовых характеристик изделий ракетно-космической техники СК приведен в таблице.

Рациональное применение СК в той или иной области должно основываться на принципе достаточности их функциональных характеристик, связанном с экономическим аспектом [15]. Это в свою очередь требует комп-

лексного анализа конструктивно-технологических решений применяемых СК с учетом технологии изготовления СЗ на различных стадиях подготовки производства и изготовления изделий.

Таким образом, объективными предпосылками для эффективного применения СК в ракетно-космической технике и других областях являются не только реализованные преимущества СК, но и решение ряда проблем, связанных с оптимизацией технологических допусков на параметры СЗ в зависимости от назначения СК, в которой он применяется, разработкой классификатора СЗ, его квалиметрии в системе управления качеством продукции и др., в комплексе составляющими научные основы технологической подготовки и производства сотовых наполнителей и сотовых конструкций.

Библиографический список

1. Сливинский, В. И. Конструктивно-технологические решения по созданию рациональных сотовых конструкций различного назначения / В. И. Сливинский // Машиностроение Украины: Новые технологии / ДГУ. Днепропетровск, 1999. С. 51–88.
2. Сливинский, В. И. Научно-технические предпосылки создания в Украине наукоемкой технологии и производства сотовых наполнителей и конструкций на их основе для различных отраслей промышленности / В. И. Сливинский // Технологические системы. 1999. № 2. С. 16–18.
3. Сливинский, В. И. Сотовые наполнители. Классификация, применение, расчет физико-механических характеристик / В. И. Сливинский, В. В. Пергат, Г. В. Ткаченко; ЦНТИ «Поиск». Киев, 1990. 43 с.
4. Ендогур, А. И. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование / А. И. Ендогур, М. В. Вайнберг, К. Н. Иерусалимский. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
5. Панин, В. Ф. Конструкции с наполнителями: справ. / В. Ф. Панин, Ю. А. Гладков. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
6. Кобелев, В. Н. Расчет трехслойных конструкций / В. Н. Кобелев, Л. М. Коварский, С. И. Тимофеев. М.: Машиностроение, 1984. 304 с.
7. Таран, Г. Ф. Применение конструкций из полимерных композиционных материалов как перспективное на-

Уровень массовых характеристик изделий ракетно-космической техники СК

Изделие	Фирма	Погонная масса, кг/м ²	
		достигнутая на 2003 г.	перспектива 2007 г.
Каркасы панелей солнечных батарей «Ямал-100», «Ямал-200»	РКК «Энергия»	1,622	1,0
«Микроспутник», каркасы батарей фотопреобразователей	ГКБ «Южное»	1,6	1,0
Головные обтекатели РН «Протон-М»	ГКНПЦ им. М.В. Хруничева	11,0	6,0
Панели негерметичных корпусов КА «Ямал» с тепловыми трубами	РКК «Энергия»	6,0-8,0	4,0-7,0
Панели негерметичных корпусов КА связанных спутников с жидкостными коллекторами	НПО ПМ	5,4-12,4	5,0-10,0

правление решения задач по созданию изделий типа «Союз» / Г. Ф. Таран, А. Н. Кашицин, С. В. Максимов и др. // Композиционные материалы в промышленности: материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф. Ялта, 2002. С. 117–118.

8. Петраковский, С. В. Возможности повышения энергомассовых характеристик ракеты-носителя «Протон-М» путем внедрения конструкций из полимерных композиционных материалов / С. В. Петраковский, Ю. О. Бахвалов, Н. В. Мухин и др. // Тез. докл. XII науч.-техн. конф. Обнинск, 2001. С. 107–110.

9. Гайдачук, А. В. Методика оптимального проектирования облегченных конструкций солнечных батарей / А. В. Гайдачук, В. В. Кириченко, В. И. Сливинский и др. // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. / ХАИ. Харьков, 1995. С. 212–217.

10. Гайдачук, В. Е. Концепция теоретического обеспечения технологии изготовления суперлегких панелей солнечных батарей космического назначения / В. Е. Гайдачук, А. И. Грошевой, В. В. Кириченко и др. // Авиационно-космическая техника и технология: тр. Харьков. авиац. ин-та им. Н. Е. Жуковского за 1997 г. / ХАИ. Харьков, 1998. С. 322–327.

11. Сливинский, В. И. Технологические возможности формирования супертонких препрегов для несущих панелей солнечных батарей космического назначения /

В. И. Сливинский, Х. Э. Тамайо // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского / ХАИ. Харьков, 1999. Вып. 17(4). С. 68–77.

12. Ситало, В. Г. Перспективы применения СК в разработках КБ «Южное» / В. Г. Ситало, Ю. Г. Артеменко, Ф. М. Телевной // Космическая техника, ракетное вооружение: сб. науч.-техн. тр. / ГКБ «Южное». Вып. 1. Днепропетровск, 2004. 335 с.

13. Иванов, А. А. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники / А. А. Иванов, С. М. Кашин, В. И. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 2000. 584 с.

14. Сливинский, В. И. Эффективность нанесения клея из расплава на торцы сотового заполнителя / В. И. Сливинский, Х. Э. Тамайо // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. НАКУ «ХАИ», посвящ. 70-летию ХАИ / ХАИ. Вып. 22(5). Харьков, 2000. С. 146–150.

15. Гайдачук, А. В. О концепции квалиметрии и управления качеством производства сотовых заполнителей и конструкций / А. В. Гайдачук, В. И. Сливинский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. трудов гос. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского / ХАИ. Вып. 22(5). Харьков, 2000. С. 56–64.

V. I. Slivinsky, G. V. Tkachenko, M. V. Slivinsky

EFFECTIVENESS OF THE APPLYING OF CELLULAR CONSTRUCTIONS IN AIRCRAFT

Is substantiated the effectiveness of applying cellular fillers and cellular constructions in the products of aerospace technology. Are show the examples of the creation of modern cellular constructions for aircraft. Are described the new possibilities of creation rational cellular constructions.

УДК 629.78.

В. И. Халиманович, А. К. Шатров, Е. А. Лысенко, М. Д. Евтифьев

ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ НА ВИБРАЦИОННЫЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Рассматривается способ выявления дефектов КА в процессе изготовления методами вибрационных и акустических воздействий.

В настоящее время для современных космических аппаратов (КА), конструкции которых состоят из сотовых панелей больших размеров, штанг антенн и т. д., экспериментальное подтверждение акустической и вибрационной прочности является особенно актуальным.

Для проведения испытаний на акустические и вибрационные воздействия были созданы уникальные установки, которые учитывают особенности конструкции КА и воздействия на них ракет-носителей (РН) и разгонных блоков (РБ) на участке выведения.

Наиболее универсальными установками являются электродинамические вибрационные стенды (ЭДВ) и реверберационная (акустическая) камера. Испытания на таких установках основаны на моделировании вибрационных и звуковых полей с заданными спектральными характеристиками, которые эквивалентны динамическим нагрузкам, действующим на КА в процессе работы двигательных установок РН и звуковых воздействий, которые возникают на старте и на участке выведения.

Испытания на вибростендах и реверберационных камерах (РК) являются испытаниями на подтверждение качества спроектированной конструкции КА.

Однако успешная отработка конструкции КА не является достаточно полным и однозначным критерием качества готового к эксплуатации КА, так как при изготовлении космического аппарата часто вносятся изменения в базовую технологию, отклонения от которой могут быть вызваны наличием изменений, требующих дополнительной экспериментальной отработки.

На качество готового к эксплуатации КА влияют следующие факторы:

- изменение качества материалов;
- изменение технологии изготовления элементной базы;
- непредвиденная замена элементной базы и датчиковой аппаратуры;
- комплектование дополнительной аппаратурой;
- незначительные ошибки при изготовлении;
- влияние человеческого фактора при сборке.

Произвести оценку влияния указанных факторов на надежность КА после сборки без выполнения выходных испытаний практически невозможно.

Проверка механических, электрических параметров и функционирования дает достаточно надежный результат только при условии предварительного провоцирующего механического воздействия на готовый к эксплуатации КА.

Для положительного решения задачи необходимо, чтобы уровни механических воздействий были смягчены относительно испытательных режимов до эксплуатационного уровня, имелась возможность получения ин-

формации о фактическом состоянии объекта испытаний, осуществлялось сопоставление получаемых значений параметров с заранее заданными.

Способ механического воздействия на КА с помощью управляемого ЭДВ имеет следующие недостатки:

- конструкция КА обладает рядом собственных частот колебаний, плотность которых не позволяет найти приемлемое распределение амплитуд колебаний по конструкции;
- нагружение конструкции в областях резонансов ведет к снижению уровня возбуждения и, как следствие, к недогрузу приборных блоков и конструктивных элементов, где резонансы отсутствуют;
- нагружение конструкции в областях частот выше резонансных эффективно проявляется в зоне интерфейса объекта с ЭДВ, но практически не оказывает влияния на удаленные зоны.

Схема расположения КА на ЭДВ и возможное размещение виброизмерительных преобразователей (ВИП) на КА в процессе виброиспытаний приведена на рис. 1.

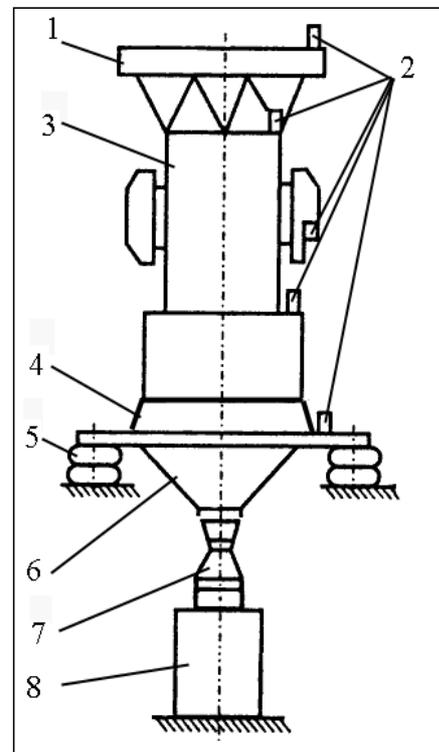


Рис. 1. Размещение ВИП на КА в процессе виброиспытаний на ЭДВ: 1 – антенный блок; 2 – ВИП; 3 – космический аппарат; 4 – устройство отделения; 5 – пневмоопоры; 6 – оснастка; 7 – шаровой шарнир; 8 – электродинамический вибровозбудитель

Математическая модель откликов на возбуждение синусоидальных колебаний для определения собственных частот, форм колебаний и коэффициентов демпфирования описывается уравнением равновесия свободной системы при вынужденных колебаниях

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F \sin(\omega t),$$

где $[M]$ – матрица масс; x – вектор смещений с соответствующими $x(i, k)$; $[K]$ – матрица жесткостей; F – вектор амплитуд внешних возмущающих сил, составляющих $f(K)$; $[C]$ – матрица коэффициентов вязкого сопротивления.

В настоящее время существуют алгоритмы, позволяющие достаточно корректно сформировать матрицы.

Пример формирования уровня входного воздействия для проведения виброиспытаний модуля полезной нагрузки (МПН) КА «Экспресс-АМ1» на воздействие гармонических вибраций, на основе анализа откликов элементов конструкции с применением методики вырезания входного сигнала на основных тонах колебаний конструкции и уровнях квалификации оборудования КА показан на рис. 2. Назначаемый входной уровень не превышает уровней квалификации конструкции, т. е. не может нанести повреждения объекту испытания. В то же время воздействующий уровень находится выше эксплуатационного уровня, найденного на основе совместного анализа РН и КА, позволяя утверждать, что дефекты, способные проявиться во время эксплуатации КА, обязательно проявятся в результате испытательного вибрационного воздействия.

В процессе виброиспытаний получается выходной сигнал, который показывает реальные отклики на гармонические воздействия в различных точках конструкции КА. Этот сигнал проходит первичную, а затем вторичную обработку, и в результате мы можем видеть графический вариант этого сигнала, например отклики на испытательный режим высокого уровня.

По шангоутам в процессе испытаний КА «Экспресс-АМ1» по оси X осуществляется распределение высокоуровня колебательных процессов (рис. 3).

Сложность амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) конструкции КА не позволяет равномерно нагрузить всю конструкцию КА, в результате чего остаются зоны, не проверенные на вибрационную стойкость, и в них остаются не выявленные дефекты.

Приведем пример сопоставления откликов одной из точек конструкции при воздействии вибрации малых уровней до испытательного воздействия и после него (рис. 4). При сопоставлении видно, что графики откликов совпадают в пределах погрешностей измерений, свидетельствуя о сохранении жесткости, т. е. целостности области конструкции, в которой установлен ВИП.

С точки зрения равномерности нагружения всей конструкции КА, привлекательным является способ возбуждения колебаний акустическим полем со случайным спектром частот в реверберационной камере (РК). Спектральная плотность такого воздействия может быть задана заранее и контролироваться в процессе нагружения. В НПО ПМ для проведения акустических испытаний создана и работает РК объемом 660 м³ с максимальным уровнем звукового давления 152 дБ.

Расположение КА в реверберационной камере и установка контрольных микрофонов, а также датчиков акустического давления при акустических испытаниях дана в виде схемы (рис. 5).

Приведем зависимость спектральной плотности мощности звукового давления от частоты звука. Средний график, представляющий собой бьющуюся кривую, и есть фактический результат, получаемый с микрофонов (М1...М4), расположенных по схеме рис. 5 (рис. 6).

Спектральная плотность мощности акустического давления и вибрации по разным осям зависит от частоты в



Рис. 2. Входной уровень возбуждений для проведения виброиспытаний МПН КА «Экспресс-АМ1» на воздействие гармонических вибраций по одной из осей

реальных испытаниях макета КА в реверберационной камере. Акустические воздействия на конструкцию КА распределяются равномерно (рис. 7). Распределение акустического давления по поверхности КА показано на рис. 8.

Учитывая все сказанное выше, для выявления пропущенных дефектов КА, готового к эксплуатации можно предложить следующий порядок проведения испытаний:

1. Экспериментально определяется АЧХ конструкции КА по откликам акселерометров (ВИП), расположенных на КА, под синусоидальным воздействием ЭДВ.

2. Проводится нагружение КА с помощью ЭДВ, а затем в РК последовательно низким, средним, высоким и вновь низким уровнями нагружения с контролем и анализом откликов ВИП. При необходимости режим корректируется, чтобы избежать перегрузки отдельных элементов.

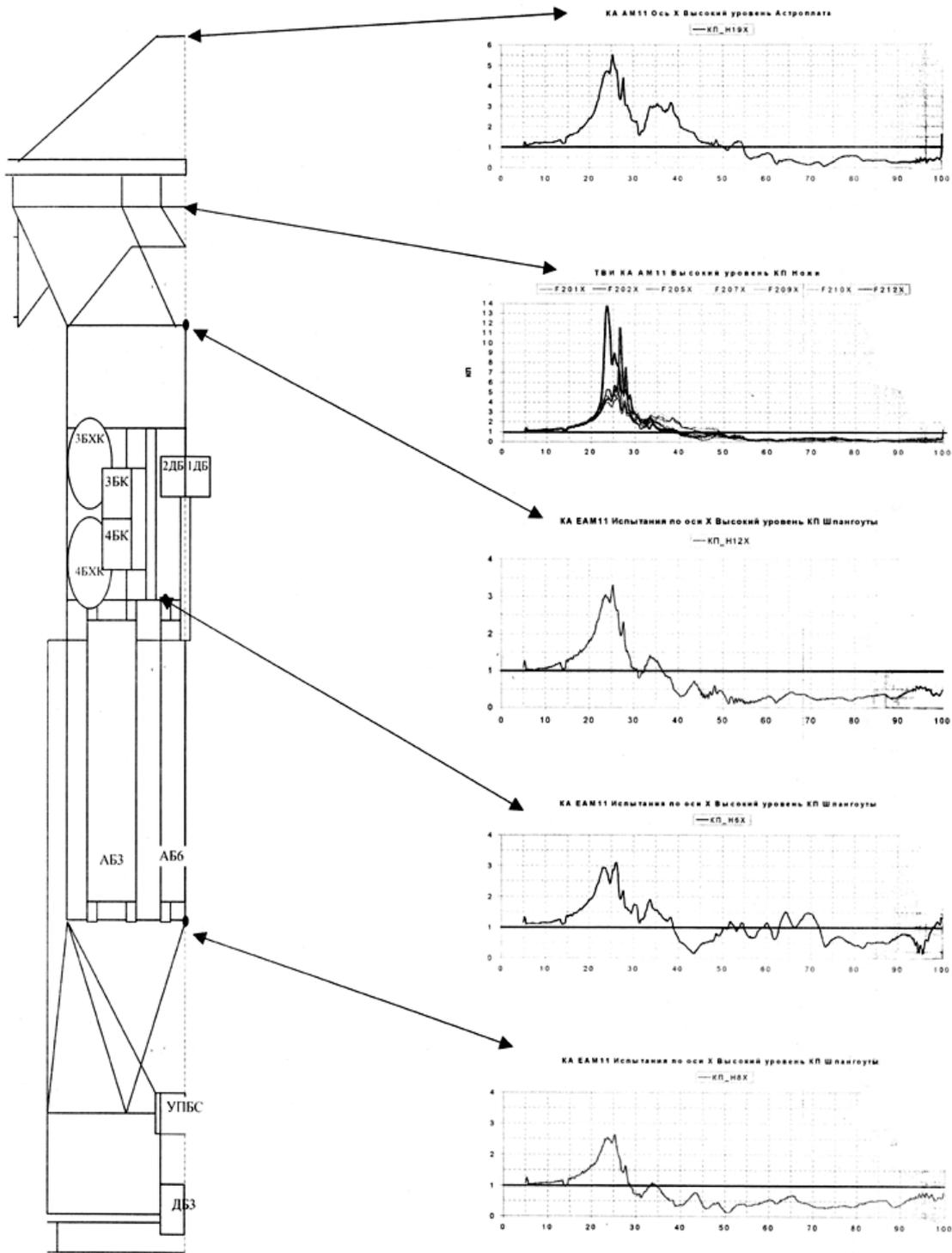


Рис. 3. Распределение высокого уровня колебательных процессов по шпангоутам в процессе испытаний КА «Экспресс-AM11» по оси X

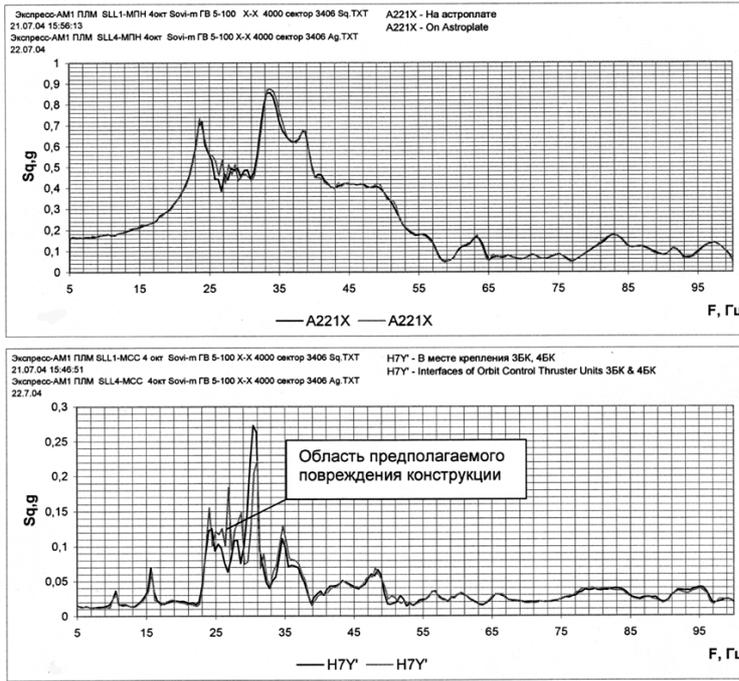


Рис. 4. Сопоставление откликов одной из точек конструкции при воздействии вибрации малых уровней до испытательного воздействия и после него

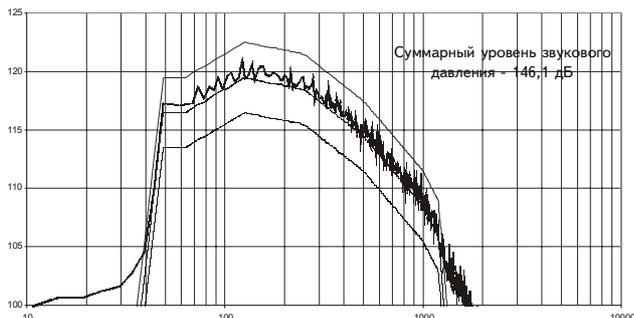


Рис. 6. Зависимость уровня звукового давления от октавной частоты звука

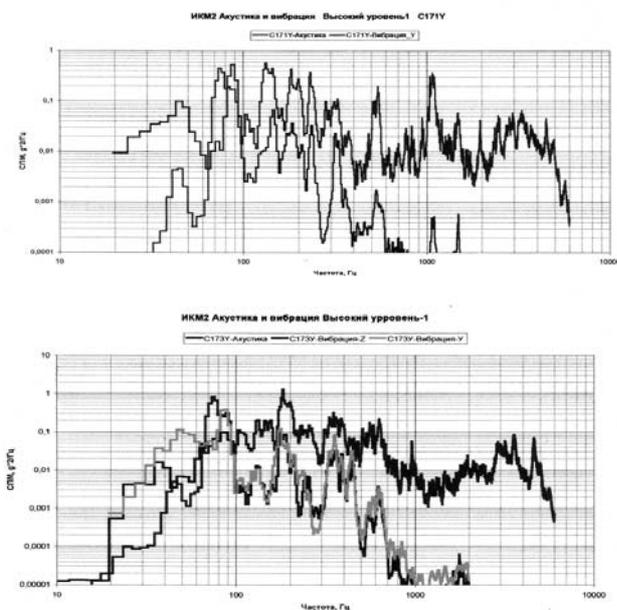


Рис. 7. График зависимости спектральной плотности мощности акустического давления и вибрации по разным осям от частоты в реальных испытаниях макета КА в РК

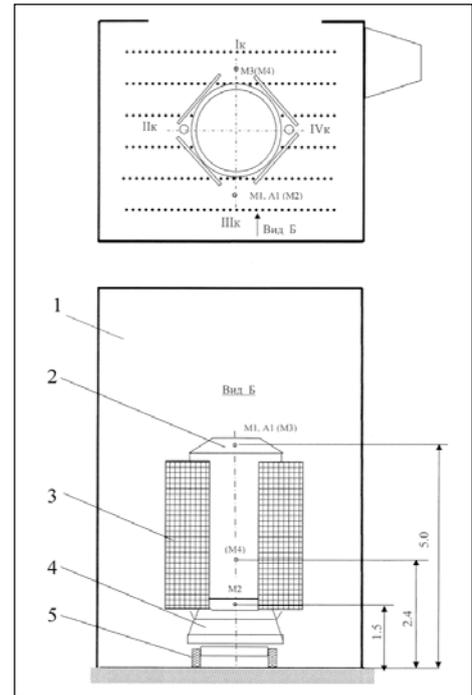


Рис. 5. Расположение КА и расстановка контрольных микрофонов (М1...М4) и датчиков акустического давления А1 при испытании КА в РК: 1 – реверберационная камера; 2 – антенный блок; 3 – блок солнечных батарей; 4 – устройство отделения; 5 – тележка

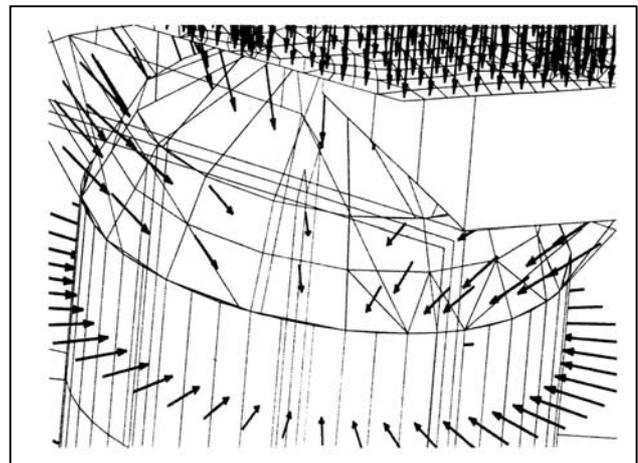


Рис. 8. Модель распределения акустического давления по поверхности КА

3. Сопоставляются отклики ВИП на малых уровнях, с целью определения возможных зон повреждений.
4. Повторно определяется АЧХ по методу синусоидального зондирующего воздействия (при необходимости).
5. Сопоставляются результаты всех воздействий с целью определения зон недогрузки и возможной потери жесткости, определения возможных мест повреждений.
6. Принимаются решения о локальном возбуждении недогруженных зон путем акустического воздействия прямым излучением.
7. КА отправляется на проверку функционирования. Предлагаемый технологический процесс позволяет путем вибрационного возбуждения всех зон конструк-

ции управляемыми воздействиями ЭДВ и РК спровоцировать скрытые дефекты, обнаружить их и дать оценку надежности готового к эксплуатации КА.

Таким образом, для реализации изложенного выше технологического процесса необходимо иметь:

– нормы режимов безопасных зондирующих воздействий;

– нормы воздействий акустическим давлением высокого уровня;

– анализ экспериментальных данных прогнозов откликов и формирования безопасных режимов нагружения.

Также следует ввести критерий оценки сопоставляемых результатов обработки экспериментальных данных с целью определения наличия дефектов; подробно изучить поведение возбуждаемой конструкции при одновременном воздействии локального и общего акустического возбуждения в РК.

V. I. Khalimanovitch, A. K. Shatrov, E. A. Lysenko, M. D. Evtifjev

DETECTION OF DEFECTS IN SPACECRAFTS DURING VIBRATION/ACOUSTIC TESTS UNDER LABORATORY ENVIRONMENT

It is offered a way to improve detection of defects in spacecrafts during the fabrication phase with vibration/acoustic test procedures.

Л. Г. Шаймарданов, Е. А. Нартов

АНАЛИЗ СТРАТЕГИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РУЛЕВЫХ ПРИВОДОВ САМОЛЕТОВ ТУ-154 М И Б

Дан анализ отработки ресурсов рулевыми приводами самолетов Ту-154М и Б. Показана необходимость корректировки стратегии их технического обслуживания.

В основу выбора стратегий технического обслуживания агрегатов и комплектующих изделий функциональных систем самолетов гражданской авиации закладываются в первую очередь принципы и подходы, обеспечивающие поддержание надежности, соответствующей требованиям норм летной годности, и гарантирующие тем самым безопасность полетов. Вместе с этим для нормированного уровня безопасности полетов целесообразно создать условия в виде минимальных затрат труда и средств, и за счет этого повысить экономическую эффективность и конкурентоспособность авиационных перевозок.

Ресурсы и срок службы самолетов определяется налетом и сроком службы планера, поэтому ресурсы агрегатов функциональных систем исчисляются в часах налета. Исключение составляют агрегаты шасси и двигателей. Ресурсы (наработку) шасси оценивают числом посадок, имея в виду, что оно равно числу взлетов.

Ресурс двигателей исчисляется как по налету, так и по числу циклов. Оно фактически совпадает с числом взлетов (посадок), поскольку именно на взлете и последующем наборе высоты двигатели работают на повышенных режимах: взлетном и номинальном. На самолетах Ту-154М и Б эксплуатируются агрегаты, работающие в циклическом режиме на взлетах и посадках. К ним относятся приводы средств механизации планера: привод выпуска-уборки закрылков (РП-60-1), предкрылков (ЭПВ-8П), механизм управления стабилизатором (МУС-3ПТВ), рулевой привод выпуска средних интерцепторов (РП-59), гидrocилиндр управления внутренними интерцепторами.

В близких к указанным агрегатам режимах работают и приводы управляющих поверхностей: привод элеронов, элерон-интерцепторов, рули высоты и направления. Это агрегаты РП-55-1, РП-56-1, РА-56В, РП-57, РП-58. В крейсерском установившемся полете они нагружены незначительно по сравнению с маневрами на взлете, наборе высоты, при заходе на посадку и посадке.

При выполнении исследования нами использованы статистические материалы, характеризующие условия эксплуатации самолетов (табл. 1). Здесь отражены номер борта (экземпляра) самолета; назначенный ресурс в часах и посадках; межремонтный ресурс в часах и посадках; наработка (налет) в часах и посадках с начала эксплуатации и после последнего ремонта.

По значениям часов налетов и наработки числа посадок с начала эксплуатации и после последнего ремонта рассчитаны соответствующие им налеты на одну посадку (табл. 2). По этим значениям, в порядке возрастания налета на посадку, построены их геометрические отображения (рис. 1 и 2). Характер изменения налета на посадку дает возможность, пренебрегая небольшими отклонени-

ями, моделировать его прямыми линиями. При этом закон, по которому распределяется плотности вероятности налета на посадку, будет равномерным.

Согласно рис. 1 и 2 можно установить, что налет на посадку с начала эксплуатации самолетов изменяется в интервале 1,5...3 ч, а после последнего ремонта – в интервале 1...3 ч на посадку. Это различие естественно, поскольку налет с начала эксплуатации существенно больше, чем после последнего ремонта, и реализован он в более широком интервале деятельности авиапредприятия, осуществляющего использование самолетов по назначению.

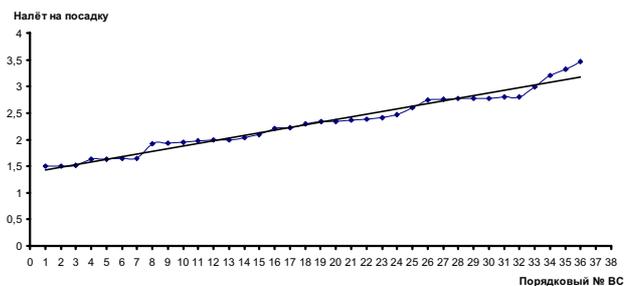


Рис. 1. Налет на посадку с начала эксплуатации

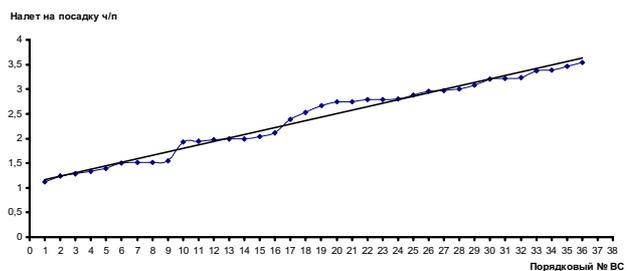


Рис. 2. Налет на посадку после последнего ремонта

Значения налета на посадку после последнего ремонта для экземпляров самолетов авиакомпаний городов Красноярск и Самары приведены на рис. 3 и 4. Красноярские самолеты имеют налет на посадку в диапазоне 2...3 ч, а Самарские – 1,5...2,4 ч.

Равномерная плотность распределения налета на посадку указывает на то, что вероятности 1, 2 и 3 ч налета на посадку для парка из 37 рассматриваемых самолетов трех авиакомпаний, одинакова. Поскольку рулевым приводам назначен ресурс в 12 000 летных часов, количество циклов их срабатывания, т. е. фактическая наработка по выпуску-уборке средств механизации планера самолета изменяется в три раза (4 000...12 000 циклов). Статистические материалы авиакомпании «Красноярские авиалинии» показывают, что за весь период эксплуатации самолетов

Ту-154М и Б отказов рулевых приводов не наблюдалось. Были досрочные (до выработки ресурса) замены, обусловленные неисправностями, не влияющими на безопасность полетов. В связи с этим закономерно постановка

вопроса об увеличении межремонтного ресурса рулевых приводов до межремонтного ресурса планера либо об их переводе на техническое обслуживание по фактическому техническому состоянию с контролем параметров.

Таблица 1

Исходный статистический материал по налету и посадкам

Аэропорт базирования	Борт №	Назнач. рес. ч	Назнач. рес. п	Меж. рем. ч	Меж. рем. п	Нар. СНЭ ч	Нар СНЭ п	Нар. ППР ч	Нар ППР п
Красноярск	85201	37500	16000	15000	5000	36407	13236	14791	4972
	85417	41000	16000	13500	4400	39273	15073	11799	4234
	85418	43500	17500	13800	4600	42635	17260	12903	4469
	85489	40000	16000	3055	2713	38117	13715	1172	428
	85505	37500	16000	3916	3809	36449	13219	2865	1028
	85529	38500	16000	10000	4000	35928	12972	62	21
	85660	30000	15000	10000	4000	24163	10880	6467	1914
	85672	30000	15000	14500	4350	13048	3759	13048	3759
	85678	30000	15000	12500	4150	19265	8695	10194	3829
	85679	30000	15000	15000	4400	25429	9098	13651	3855
	85682	25000	12500	14300	4500	12854	4016	12854	4016
	85683	25000	12500	10000	4000	18501	7903	8541	3041
	85694	25000	12500	10000	4000	20554	8505	8550	2651
	85702	25000	12500	10000	4155	22022	9421	4915	3973
	85704	25000	12500	10000	4000	17037	6129	2162	719
85708	25000	12500	10000	4150	19043	6813	3601	1061	
85720	25000	12500	10000	4000	20096	8778	4802	3106	
85759	25000	12500	10000	4000	15118	6366	948	376	
Самара	85585					32670	17059	5791	3816
	85500					35349	17793	10926	5504
	85267					33517	16929	7226	3540
	85472					35349	17793	10926	5504
	85716	30000	15000	15000	4400	12898	5399	12898	5399
	85723					11302	5395	5016	2379
	85731					10175	5250	10175	5250
	85792					9067	5504	459	167
	85817					5724	3789	5724	3789
	85821					9476	4877	9476	4877
85822					9807	5984	3317	2374	
85823					11530	5656	3397	1723	
Омск	85714	30000	15000	10000	6000	11537,51	6993	6698,09	5216
	85730	30000	15000	10000	4150	16054,46	5362	3056,4	943
	58745	25000	12500	10000	5150	16251,15	10844	5721,14	5099
	85750	30000	15000	10000	5150	17413,41	10671	6301,44	4747
	85763	25000	12500	10000	4150	10903,2	3281,5	1420,49	461,5
	85801	25000	12500	1000	6000	7807,41	5205	7807,41	5205

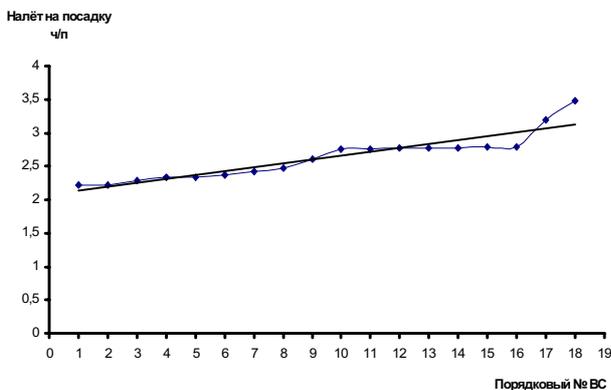


Рис. 3. Налёт на посадку самолетов авиакомпании «Красноярские авиалинии»

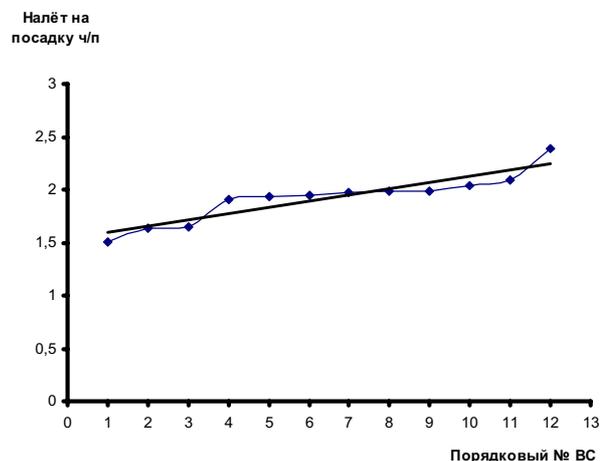


Рис. 4. Налёт на посадку самолетов авиакомпании «Самара»

Значения налета часов на одну посадку

Аэродром базирования	Борт №	Нар ППР ч/п	Нар СНЭ ч/п
Красноярск	85201	2,974859212	2,750604412
	85417	2,7867265	2,605519804
	85418	2,887223092	2,470162225
	85489	2,738317757	2,779219832
	85505	2,786964981	2,757319011
	85529	2,952380952	2,769657724
	85660	3,378787879	2,220863971
	85672	3,47113594	3,47113594
	85678	2,66231392	2,215641173
	85679	3,541115435	2,795009892
	85682	3,200697211	3,200697211
	85683	2,808615587	2,341009743
	85694	3,225198038	2,416696061
	85702	1,237100428	2,337543785
	85704	3,006954103	2,779735683
	85708	3,393967955	2,795097608
85720	1,546039923	2,289359763	
85759	2,521276596	2,374803644	
Самара	85585	1,517557652	1,915118119
	85500	1,985101744	1,986680155
	85267	2,041242938	1,97985705
	85472	1,985101744	1,986680155
	85716	2,388960919	2,388960919
	85723	2,108448928	2,094902688
	85731	1,938095238	1,938095238
	85792	2,748502994	1,647347384
	85817	1,510688836	1,510688836
	85821	1,942997745	1,942997745
	85822	1,397219882	1,638870321
85823	1,97156123	2,03854314	
Омск	85714	1,284143021	1,64986558
	85730	3,241145281	2,994117866
	58745	1,122012159	1,498630579
	85750	1,327457341	1,631844251
	85763	3,077984832	3,322626847
	85801	1,499982709	1,499982709

L. G. Shajmardanov, E. A. Nartov

THE ANALYSIS OF TECHNICAL SERVICE STRATEGIES OF STEERING WHEEL DRIVES FOR AIRPLANES TU-154M AND B

The analysis of working resource of steering wheel drives of airplanes Tu-154M and B has been made. The necessity of strategies of technical service correcting is shown.

В. В. Шеин

АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕТОВ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ РЕСУРСОВ И СРОКОВ СЛУЖБЫ СТАРЕЮЩИХ САМОЛЕТОВ ИЛ-76Т

Предлагается решение увеличения ресурсов и сроков службы стареющих самолетов Ил-76Т. Дается сравнение фактических параметров полетов и эксплуатационной нагруженности самолетов ряда коммерческих авиакомпаний с расчетными параметрами и между авиакомпаниями. Обосновывается необходимость создания головной группы самолетов Ил-76Т (ТД) и индивидуального продления ресурсов и сроков службы. Данные представлены НЦПЛГ ВС ГосНИИГА.

Активная эксплуатация коммерческих самолетов Ил-76Т в последние годы увеличивается, что прежде всего обусловлено повышением стоимости обновления парка самолетов. При этом их эксплуатационный ресурс, а также усталостные и коррозионные повреждения приближаются к своим расчетным значениям.

Поддержание летной годности стареющих самолетов Ил-76Т, продление их ресурсов и сроков службы потребовало создания головной группы самолетов. Эти самолеты опережают парк по наработке, позволяют уточнить условия эксплуатации, нагруженности и техническое состояние всего парка.

Данные фактических параметров полетов самолетов головной группы ряда авиакомпаний приведены в табл. 1...3 и на рис. 1...4. Анализируя представленные материалы, можно отметить следующие особенности эксплуатации самолетов:

– полеты самолетов, эксплуатирующихся в одной авиакомпании, выполняются, как правило, по различным трас-

сам, что приводит к значительному разбросу параметров типового полета как каждого самолета одной авиакомпании, так и между самолетами различных авиакомпаний;

– имеется существенное различие между параметрами типового полета, принятого при проектировании в начальный период эксплуатации парка самолетов и параметрами пикового полета различных авиакомпаний. Из этого следует, что установление ресурсов и сроков службы и условия отработки ресурсов и сроков службы (периодичность осмотров, карты контроля и т. п.) самолетов различных авиакомпаний должны определяться индивидуально для каждого самолета;

– различия в условиях эксплуатации самолетов Ил-76Т головной группы требуют индивидуального установления ресурсов и сроков службы не только в целом по парку, но и даже самолетам одной авиакомпании.

Анализ эксплуатационной нагруженности самолетов Ил-76Т(ТД) различных авиакомпаний позволяет сделать следующие выводы:

Таблица 1

Различие в параметрах полета самолетов по годам эксплуатации, т

Принадлежность	а/к «Абакан-Авиа»		а/к «Авиакон Цитотранс»	а/к «Добролет»
	№ 76504	№ 76505	№ 76514	№ 76418
Год эксплуатации	1998, 1999–2000	1998, 1999–2000	1999, 2000–2001	1999, 2000–2001
Параметры полета:				
Взлетная масса самолета	0,99	1	1	0,87
Посадочная масса самолета	1,03	1,05	1,03	0,9
Масса топлива на взлете	1,05	1,02	0,89	1,14
Масса топлива на посадке	1,06	1,26	0,85	1,46
Коммерческая нагрузка	1	1,04	1,5	1,02
Продолжительность полета	0,83	1	0,89	1,13

Таблица 2

Различие в параметрах полета самолетов одной авиакомпании, т

Принадлежность	а/к «Абакан-Авиа»	а/к «Красноярские авиалинии»
	№ 76504, № 76505	№ 76524, № 76463
Год эксплуатации	1999–2001	2000
Параметры полета:		
Взлетная масса самолета	1,01	1,02
Посадочная масса самолета	1	1,05
Масса топлива на взлете	1,03	0,99
Масса топлива на посадке	1,16	1,26
Коммерческая нагрузка	1,02	0,97
Продолжительность полета	0,94	—

Сравнение фактических параметров полета с расчетными, т

Принадлежность	а/к «Абакан-Авиа»	а/к «Авиакон Цитотранс»	а/к «Волга-Днепр»	а/к «Красноярские Авиалинии»	а/к «Тюменские Авиалинии»	а/к «Добролет»	Все а/к к расчетным
Параметры полета:							
Взлетная масса самолета	1,01	0,98	0,99	1,12	0,93	1,06	0,93–1,12
Посадочная масса самолета	0,97	0,94	0,97	1,04	0,83	1	0,83–1,04
Масса топлива на взлете	1,14	1,01	1,03	0,99	1,04	1,22	0,99–1,22
Масса топлива на посадке	0,92	0,91	0,95	0,6	0,89	0,95	0,49–0,95
Коммерческая нагрузка	0,93	0,89	0,98	1,62	0,82	1,17	0,82–1,67
Продолжительность полета	1,18	1,11	–	–	1,18	1,52	1,11–1,52

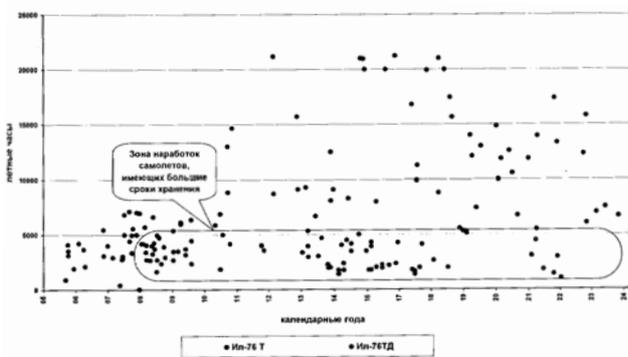


Рис. 1. Нарботка парка самолетов Ил-76Т и Ил-76ТД

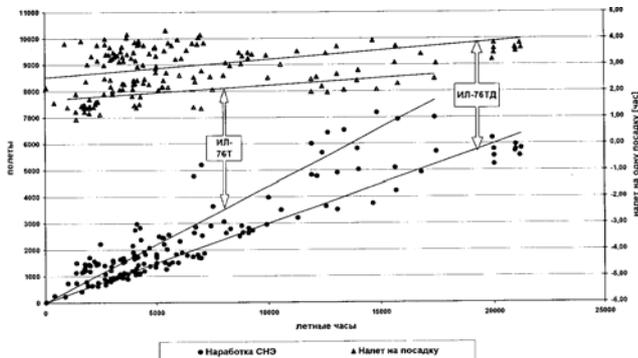


Рис. 2. Нарботка самолетов Ил-76Т и Ил-76ТД частных авиакомпаний

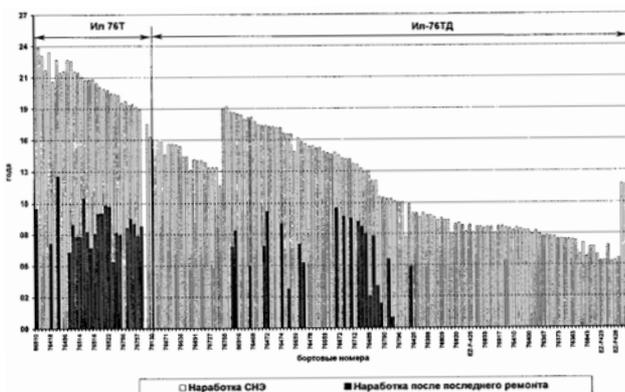
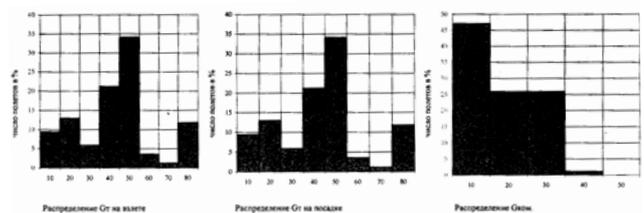


Рис. 3. Нарботка самолетов Ил-76Т и Ил-76ТД в эксплуатации частных авиакомпаний



Расчетываемые параметры	Время полета		Вес топлива на взлете		Коммерческая нагрузка		Вес самолета на взлете	
	в мин	в час	кг	т	т	т	т	т
Среднее значение	7,89	49,14	12,29	12,24	16,96	150,50	118,30	118,30
Ср. кв. отклонение	87,94	13,97	10,57	15,13	22,33	12,94		
Максимум	360	86,00	50,00	40,40	170,40	138,50		
Минимум	10,00	11,00	7,00	0,00	95,10	91,10		

Рис. 4. Распределение и статистические параметры полетов самолета Ил-76Т № 76524

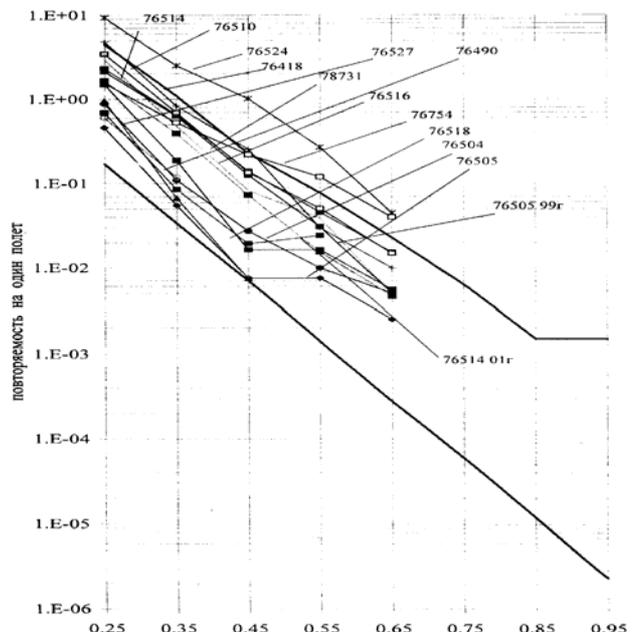


Рис. 5. Приращение вертикальной перегрузки в центре тяжести

– интегральная повторяемость приращений вертикальных перегрузок в центре тяжести самолета (рис. 5) по данным лент КЗ-63 в диапазоне эксплуатационных значений 0,25...0,65 единиц характеризуется значительным разбросом (например, для $\Delta n_y = 0,35$ от $4 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^0$) для самолетов различных авиакомпаний;

– различия в эксплуатационной нагруженности самолетов Ил-76Т должны учитываться при оценке долговечности планера, шасси и механических систем управления;

– в целом значения приращений вертикальных перегрузок в центре тяжести самолета по данным лент КЗ-63 находятся в пределах границ 95 % доверительного интервала для принятого лог-нормального закона распределения.

Кроме того, при исследовании технического состояния самолетов Ил-76Т головной группы были впервые обнаружены следующие дефекты силовой конструкции самолетов:

– трещины кронштейна качалки системы управления элеронами;

– продольные трещины в обшивке верхней панели фюзеляжа в зоне шп. 29 между стропами 8...10;

– трещины на проемах вырезов в стенке переднего лонжерона под винтовые механизмы предкрылков 5 и 6.

Таким образом, создание головной группы самолетов Ил-76Т позволило своевременно обнаружить новые дефекты планера и механических систем управления, а также принять своевременные меры по контролю дефектов на парке самолетов Ил-76Т, ТД.

V. V. Shein

THE ANALYSIS OF FACT FLIES PARAMETERS AND EXPLOITATION LOAD DURING THE RESOURCE AND EXPLOITATION TIME LIMITS OF ELDER AIRPLANES IL-76T WORK INSTALLATION

The decision of resources and exploitation time limits of elder airplanes Il-76T enlargement is proposed. The comparison of fact parameters of flies and exploitation load of airplanes of commercial air-companies with calculation air-companies and between the air-companies has been made. The necessity of making so called Il-76 head-group, and individual resource installation has been done.

В. Г. Яцуненко

ИСПЫТАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО ВАКУУМА

Испытания жидкостных ракетных двигателей малой тяги имеют особенности, определяемые специфическими условиями их эксплуатации в составе космических летательных аппаратов. Рассмотрены научно-технические решения, обеспечивающие выполнение требований по проведению огневых испытаний в условиях, соответствующих космическому пространству.

Специфические условия работы жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ) определяются тем, что их применяют для ориентации, стабилизации, коррекции и других операций маневрирования космических летательных аппаратов (КА). Работа в импульсном режиме является одной из наиболее типичных особенностей ЖРДМТ, что обуславливает необходимость оценки характеристик переходных процессов в камере сгорания в различных условиях эксплуатации.

Камеры двухкомпонентных ЖРДМТ при непрерывном режиме работы на топливе N_2O_2 и НДМГ при $\bar{F}_a = 40 \dots 150$ и тяге $P_n = 2,2 \dots 445$ Н обеспечивают удельный импульс $I_{у.п} = 2735 \dots 2825$ м/с [1]. При импульсном режиме удельный импульс ЖРДМТ ниже, причем чем меньше время импульса тяги, тем ниже удельный импульс. При длительности включения двигателя 6...20 мс удельный импульс может иметь значения 1860...2350 м/с. Секундный расход компонентов топлива имеет достаточно низкие значения. Например, в ЖРД R-6B расходы окислителя и горючего составляют всего 0,5 и 0,3 г/с соответственно.

Проведение стендовых (наземных) огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги, имитирующих эксплуатационные условия, является достаточно сложной задачей. При разработке стендов для испытаний ЖРДМТ должны быть решены основные задачи: имитация высотных условий работы и измерение параметров, оценивающих качество двигателей. Импульсные режимы определяют характер переходных процессов с высокими скоростями изменения параметров двигателей. Параметры высотных условий обычно находятся в диапазоне давлений $10^{-5} \dots 10^{-8}$ Па в зависимости от расположения орбиты КА, на котором устанавливаются ЖРДМТ.

Для проведения испытаний с имитацией высотных условий (глубокого вакуума) используются барокамерные испытательные стенды. В состав такого стенда входят системы подачи компонентов топлива в двигатель, барокамера, вакуумные насосы, система измерения вакуума и параметров двигателя.

Барокамеру и комплект вакуумного оборудования выбирают исходя из условий работы испытуемых двигателей, давления и температуры в барокамере, требуемой производительности стенда и др. Методика выбора параметров барокамеры и вакуумного оборудования, обеспечивающих заданные условия испытаний, может быть следующей.

Общая постановка задачи. Техническое задание на проведение испытаний всегда содержит требования к условиям, которые должен обеспечить испытательный стенд. К ним в первую очередь относятся:

- верхний P_v и нижний P_n допустимые пределы давления в барокамере в период испытаний;
- характеристики импульсного режима (время включения, время останова, пауза между включениями, количество и частота включений);
- давления и температуры компонентов топлива на входе в двигатель;
- ожидаемые секундные расходы окислителя и горючего в период работы двигателя.

Заданные условия проведения испытаний должны однозначно определять технические характеристики испытательного стенда, в том числе барокамеры и вакуумного оборудования.

Физический процесс, который требуется организовать при проведении испытаний ЖРДМТ в условиях глубокого вакуума, представлен на рис. 1.

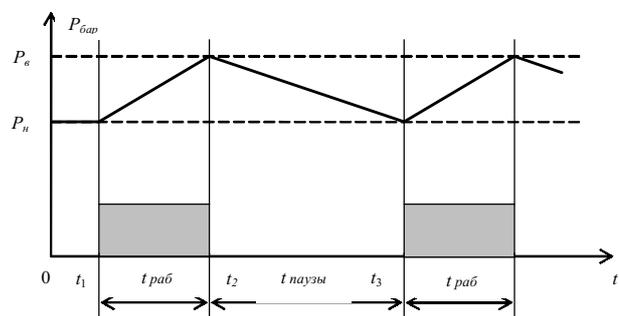


Рис. 1. График изменения давления в барокамере:
 $t_{раб}$ — время работы двигателя; $t_{паузы}$ — время паузы

До включения двигателя в барокамере вакуумной системой создается остаточное давление (вакуум), значение которого близко к нижнему допустимому пределу P_n .

При работающем двигателе в барокамеру поступают продукты сгорания компонентов топлива, из-за чего давление в барокамере повышается. Однако к моменту выключения двигателя давление не должно превышать верхний допустимый предел P_v . В дальнейшем за время паузы вакуумная система должна произвести откачку из барокамеры и обеспечить в камере давление, близкое к нижнему допустимому пределу P_n . После этого цикл импульсного включения повторяется.

Возникает задача создания математической модели, позволяющей установить зависимость между параметрами испытываемого ЖРДМТ и техническими характеристиками барокамеры и вакуумного оборудования.

Анализ физического процесса. В интервале $(0, t_1)$ система находится в равновесном состоянии, которое обес-

печивается работающими вакуумными насосами, их число может составлять некоторую долю от всех вакуумных насосов испытательного стенда. В барокамере поддерживается уровень давления, близкий к нижнему допустимому пределу P_n .

В интервале (t_1, t_2) в работу включается двигатель, и в барокамеру начинают поступать продукты сгорания. Обозначив суммарный массовый секундный расход компонентов топлива $m_\Sigma(t)$, запишем выражение для определения массы продуктов сгорания, поступивших в барокамеру за время работы двигателя:

$$M_\Sigma = \int_{t_1}^{t_2} m_\Sigma(t) dt. \quad (1)$$

Продукты сгорания, имеющие температуру $T_{п.с}$, соприкасаясь в барокамере с массой остаточного газа (например, воздуха) $M_{ост}$ с температурой $T_{ост}$, создают газовую смесь, которая заполняет внутренний объем барокамеры $V_{бар}$. Для простоты рассуждений принимаем, что давление продуктов сгорания на срезе сопла камеры сгорания двигателя равно давлению в барокамере, а временем перемешивания продуктов сгорания с остаточным газом в барокамере можно пренебречь.

Зависимость массы остаточного газа (воздуха) $M_{ост}$ и внутреннего объема барокамеры $V_{бар}$ определяют, воспользовавшись уравнением состояния:

$$P_n V_{бар} = M_{ост} R_{ост} T_{ост}, \quad (2)$$

где $R_{ост}$ – газовая постоянная для остаточного газа (для воздуха $R = 287$ Дж/(кг · град)).

Для оценки уровня возможных значений $M_{ост}$ примем приемлемые для практики значения входящих в уравнение состояния величин: $P_n = 10^{-8}$ Па; $V_{бар} = 50$ м³; $T_{ост} = 293$ К. Тогда

$$M_{ост} = \frac{P_n V_{бар}}{R T_{ост}} = \frac{10^{-8} \cdot 50}{287 \cdot 293} = 0,0595 \cdot 10^{-10} \text{ кг.}$$

Для этой же цели рассчитаем значение M_Σ при условии, что $m_{\Sigma ср} = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/с и продолжительность работы двигателя (импульса) $\Delta t = t_2 - t_1 = 0,5$ с. Тогда

$$M_\Sigma = m_{\Sigma ср} \Delta t = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Так как отношение $M_\Sigma / M_{ост}$ очень велико (более 10^8), то в некоторых случаях значением $M_{ост}$ при последующих расчетах можно пренебречь.

Кроме того, в интервале (t_1, t_2) включаются на полную производительность все вакуумные насосы испытательного стенда. Производительность различных типов вакуумных насосов зависит от величины давления откачиваемого газа: при понижении давления производительность насоса уменьшается. Необходимо учесть, что в сложившейся практике производительность вакуумных насосов задается в единицах объема, приведенных к нормальным условиям. Обозначив производительность вакуумной системы как $Q(t)$, запишем выражение для расчета массы газовой смеси, удаляемой из барокамеры вакуумной системой с период от t_1 до t_2 :

$$M_{выбр} = \rho_{н.у} \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt, \quad (3)$$

где $\rho_{н.у}$ – плотность газовой смеси в нормальных условиях.

Таким образом, интервал (t_1, t_2) характеризуется тем, что в этот период часть газовой смеси в количестве $M_{выбр}$

уносится из барокамеры вакуумной системой, а оставшаяся часть

$$M_{бар} = M_\Sigma + M_{ост} - M_{выбр} \quad (4)$$

должна не превышать верхний допустимый предел P_b при заполнении внутреннего объема $V_{бар}$ барокамеры.

Принимая газовую смесь идеальной, запишем уравнение состояния для момента времени t_2 :

$$P_b V_{бар} = M_{бар} R_{см} T_{бар},$$

где $R_{см} = q_1 R_{ост} + q_2 R_{п.с}$ – газовая постоянная смеси, q_1, q_2 – относительное массовое содержание компонентов газовой смеси; $R_{ост}, R_{п.с}$ – газовые постоянные остаточного газа и продуктов сгорания соответственно; $T_{бар}$ – температура газовой смеси в барокамере.

По этому уравнению находим выражение для расчета оптимального значения объема барокамеры:

$$V_{бар} = \frac{M_{бар} R_{см} T_{бар}}{P_b}. \quad (5)$$

В интервале (t_2, t_3) двигатель выключается и производится откачка газовой смеси вакуумными насосами, что обеспечивает к моменту t_3 давление в барокамере, близкое к нижнему допустимому пределу P_n . Очевидно, что процесс в этом интервале полностью определяется производительностью вакуумных насосов испытательного стенда, среднее значение которой можно рассчитать по формуле

$$Q_\Sigma^* \geq \frac{M_{бар}}{\rho_{н.у} (t_3 - t_2)}. \quad (6)$$

Вывод формулы для расчета. Используя ранее полученные выражения (1)...(6) и учитывая, что значением массы остаточного газа можно пренебречь, выведем окончательную формулу для расчета оптимального объема барокамеры испытательного стенда для огневых испытаний ЖРДМТ в условиях глубокого вакуума:

$$V_{бар} = \frac{R_{п.с} T_{бар}}{P_b} \int_{t_1}^{t_2} [m_\Sigma(t) - Q(t)] dt.$$

Существенным недостатком полученной формулы является принятое предположение о том, что функциональные зависимости $m_\Sigma(t)$ и $Q(t)$ известны, в то время как на практике это не всегда имеет место, так как эти зависимости могут быть получены путем проведения ряда испытаний.

Оценку оптимального объема барокамеры с достаточной степенью достоверности можно выполнить по известным статистическим значениям параметров, влияющих на объем. Такими параметрами являются средние значения суммарного расхода компонентов топлива m_Σ^* и производительности вакуумной системы $Q_{ср}^*$ в интервале давлений $P_b \dots P_n$. При заданных интервалах (t_1, t_2) и (t_2, t_3) найдем следующие значения:

$$M_\Sigma^* = m_\Sigma^* (t_2 - t_1), \quad M_{выбр}^* = \rho_{н.у} Q_{ср}^* (t_2 - t_1),$$

$$M_{бар}^* = \rho_{н.у} Q_{ср}^* (t_3 - t_2),$$

$$M_{бар}^* = M_\Sigma^* - M_{выбр}^* = m_\Sigma^* (t_2 - t_1) - \frac{M_{бар}^* (t_2 - t_1)}{(t_3 - t_2)},$$

откуда определяем

$$M_{бар}^* = \frac{m_\Sigma^* (t_2 - t_1) (t_3 - t_2)}{(t_3 - t_1)}.$$

Тогда окончательное выражение для оценки внутреннего объема барокамеры испытательного стенда по статистическим данным будет иметь вид

$$V_{\text{бар}}^* = \frac{M_{\text{бар}}^* R_{\text{см}} T_{\text{бар}}}{P_{\text{в}}} = \frac{m_{\Sigma}^* R_{\text{см}} T_{\text{бар}}}{P_{\text{в}}} \cdot \frac{(t_3 - t_2)(t_2 - t_1)}{(t_3 - t_1)}$$

Значительный опыт по созданию стендов для огневых испытаний ЖРДМТ накоплен на испытательном комплексе ФГУП «Красноярский машиностроительный завод». На этих стендах проведены испытания ряда конструкций ЖРДМТ, успешно эксплуатируемых в настоящее время в составе космических летательных аппаратов.

Для имитаций космических условий были внедрены термобарокамеры объемом более 50 м³ с трубчатым экраном, в который подается необходимый объем жидкого азота. На охлажденный жидким азотом экран осаждаются продукты сгорания компонентов топлива, что существенно увеличивает время поддержания в термобарокамере заданного давления (вакуума) на срезе сопла камеры сгорания в период работы двигателя (рис. 2).

Перед началом огневых испытаний требуемое остаточное давление (вакуум) в термобарокамере создается каскадом вакуумных насосов, который формируется определенным набором механических, паромасляных и других насосов. Номенклатура набора определяется давлением в барокамере, близким к нижнему допустимому пределу $P_{\text{н}}$. Чтобы исключить влияние агрессивных продуктов сгорания на элементы насосов, их подключают к термобарокамере через специальную запорную арматуру, отсекающую насосы в период огневой наработки двигателей. Заданное условиями испытания давление на срезе камеры сгорания (в термобарокамере) обеспечивается трубчатыми экранами и значительным объемом термобарокамеры.

Осажденные на трубчатых экранах продукты сгорания имеют структуру, аналогичную снежному покрову, с плотностью $\rho_{\text{ос}} = (0,4 \dots 0,6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. При длине трубчатого экрана L и наружном d диаметре n трубопроводов, составляющих экран, площадь наружной поверхности экрана

$$S_{\text{экр}} = \pi n L d.$$

Опыт проведения огневых испытаний ЖРДМТ в условиях глубокого вакуума на испытательном комплексе ФГУП «Красноярский машиностроительный завод» по-

казывает, что толщина осаждения на трубчатом экране продуктов сгорания при практическом сохранении эффективности осаждения составляет $\delta = 0,8 \dots 1,0 \text{ мм}$.

Предельный объем осаждения продуктов сгорания до размораживания экрана будет равен

$$V_{\text{пред}} = \pi \delta n L d.$$

При полном осаждении продуктов сгорания на трубчатом экране их предельная масса

$$M_{\text{тв.п.с}} = \pi \rho_{\text{тв.п.с}} \delta n L d.$$

Учитывая, что масса продуктов сгорания, образованная при работе двигателя в течение времени Δt , равна

$$M_{\text{п.с}}^* = m_{\Sigma}^* (\Delta t),$$

можно получить простую зависимость между суммарным расходом компонентов топлива, временем работы двигателя и геометрическими размерами трубчатого экрана:

$$M_{\text{п.с}}^* = M_{\text{тв.п.с}},$$

$$\Delta t = \pi \rho_{\text{тв.п.с}} \delta n L \frac{d}{m_{\Sigma}^*}.$$

Принимая статистические значения $\rho_{\text{тв.п.с}} = (0,4 \dots 0,6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и $\delta = (0,8 \dots 1,0) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, получим приближенную формулу для расчета предельно возможного времени огневой наработки двигателя между двумя следующими друг за другом размораживаниями экрана:

$$\Delta t = (1,0 \dots 1,9) n L \frac{d}{m_{\Sigma}^*}.$$

Кроме того, следует отметить, что имеется зависимость (см. рис. 2) $n d \approx 0,8 \pi D$, а внутренний объем барокамеры можно представить выражением

$$V_{\text{бар}} = (1,1 \dots 1,2) L \frac{\pi D^2}{4},$$

тогда

$$\Delta t = (3,45 \dots 6,85) \frac{V_{\text{бар}}}{m_{\Sigma}^* \cdot D}.$$

Для оценки полученной зависимости подставим практические значения геометрических размеров барокамеры $V_{\text{бар}} = 50 \text{ м}^3$, $D = 2,0 \text{ м}$ и суммарного расхода компонентов топлива $m_{\Sigma}^* = 0,002 \text{ кг/с}$:

$$\Delta t_{\text{мин}} = 3,45 \frac{50}{0,002 \cdot 2} = 43\,125 \text{ с},$$

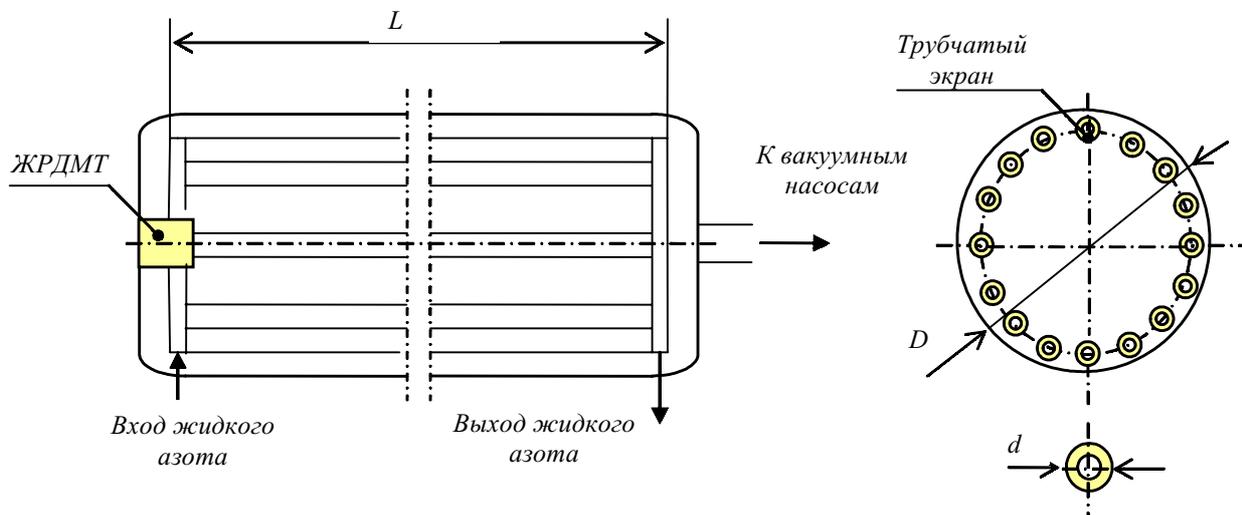


Рис. 2. Схема расположения трубчатого экрана в барокамере

что соответствует числу включений 86 250 с длительностью импульса $(t_2 - t_1) = 0,5$ с. После наработки двигателем такого числа включений испытания останавливают, экраны отогревают и размораживают осевшие на них продукты сгорания, после чего последние разбавляют водными растворами и направляют на станцию нейтрализации.

Измерение тяги ЖРДМТ при испытаниях в условиях глубокого вакуума осуществляется несколькими методами. В основу одного из них положены широко используемые при испытаниях ЖРД системы измерения быстроменяющихся давлений с применением индуктивных или тензометрических преобразователей. При этом используют тягоизмерительные устройства, в которых под действием тяги в замкнутом объеме (например, сильфонном узле) создается давление жидкости, регистрируемое системой измерения давления. В таких устройствах могут устанавливаться индуктивные первичные преобразователи типа ДД-10, ДДИ-20 и тензометрические типа ДДТ, ДДТА. Перед проведением и после окончания огневых испытаний тягоизмерительные устройства тарируют с использованием специальных нагрузочных устройств, что позволяет получать значения предельной погрешности измерения тяги ЖРДМТ до 5 %.

При оценке динамических характеристик ЖРДМТ основными временными параметрами являются время включения, выход на режим, останов, паузы между включениями и частота включения. Возникающие в тягоизмерительном устройстве силы инерции могут вносить существенные погрешности при оценке этих параметров. Чем меньше собственная частота подвижных частей устройства, тем больше инерционная погрешность будет проявляться [3]. Погрешность измерения временных параметров возрастает, когда частота импульсного режима испытываемого ЖРДМТ находится в диапазоне собственной частоты тягоизмерительного устройства, из-за про-

явления эффекта резонанса. Поэтому собственная частота колебания механической части тягоизмерительного устройства должна значительно превышать частоту импульсного режима, что обеспечивает минимизацию погрешности измерения. С учетом условия, что отношения этих частот должно составлять не менее 25...30 [2] при частоте импульсного режима, например, 25 Гц собственная частота механической части устройства должна быть 650...800 Гц. При больших частотах импульсных режимов требуемая собственная частота колебаний устройства может достигать значения 1 000 Гц и более. Одним из методов обеспечения данного требования является назначение некоторых конструктивных размеров устройства (расстояния от оси подвеса до центра масс и от оси подвеса до точки приложения упругой силы), соответствующих жесткости замкнутого объема, в котором установлены датчики давления.

Библиографический список

1. Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей: учеб. для студентов вузов по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки» / Г. Г. Гахун, В. И. Володин, М. В. Краев и др.; под общ. ред. Г. Г. Гахуна. М.: Машиностроение, 1989. 424 с.
2. Жуковский, А. Е. Испытания жидкостных ракетных двигателей: учеб. для студентов авиац. спец. вузов / А. Е. Жуковский, В. С. Кондрусев, В. В. Окорочков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 352 с.
3. Краев, М. В. Измерения параметров при огневых испытаниях жидкостных ракетных двигателей малой тяги / М. В. Краев, В. Г. Яцуненко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева / под ред. проф. Г. П. Белякова / СибГАУ. Вып. 5. Красноярск, 2004. С. 167–172.

V. G. Jazunenko

TESTS OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINES OF SMALL DRAFT IN CONDITIONS OF DEEP VACUUM

Test of liquid-propellant rocket engines of small draft have the features determined by specific conditions of their exploitation in structure of space vehicles. In clause the scientific and technical decisions providing the requirements on carrying out of fire tests in conditions, corresponding to a space are considered.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

Проведены исследования геометрических параметров распределения плотности энергии в поперечном сечении электронного луча. Для проведения исследований была создана автоматизированная система.

Энергетические параметры электронного луча (ускоряющее напряжение U , ток электронного луча I и плотность распределения энергии по его сечению) являются основными энергетическими характеристиками процесса электронно-лучевой обработки. Без контроля и стабилизации указанных параметров невозможно обеспечить необходимое качество технологического процесса. Если системы контроля и стабилизации ускоряющего напряжения и тока в настоящее время достаточно хорошо отработаны, то задача контроля и стабилизации плотности распределения энергии по сечению электронного луча требует своего решения.

Мощность электронного пучка равна $q = U \cdot I$. Если известен диаметр электронного пучка d , то можно определить удельную мощность q_2 , Вт/см², которая является одним из определяющих параметров процесса:

$$q_2 = \frac{UI}{\pi d^2 / 4}.$$

В зависимости от величины удельной мощности q_2 при одинаковой погонной энергии можно получить различную конфигурацию зоны обработки.

Наиболее существенным и одновременно наиболее трудноопределимым параметром электронного луча является его диаметр. Существует много различных способов экспериментального определения диаметра электронного луча. Среди них можно выделить группу методов, основанных на измерении распределения плотности энергии в поперечном сечении электронного луча [1-3]. Эти методы дают полную информацию об электронном луче как о технологическом инструменте. По их данным можно судить о характере распределения энергии в поперечном сечении электронного луча, степени его фокусировки и состоянии катодного узла электронно-лучевой пушки.

Обычно диаметр электронного луча определяют как ширину плотности распределения через среднее квадратическое отклонение σ , а сама плотность распределения считается распределенной по нормальному закону [1...3]. Однако существуют факторы, которые приводят к отклонению формы распределения от нормального закона [1]. На форму распределения оказывают влияние оптическая система электронно-лучевой пушки, состояние ее катодного узла, изменение параметров сварки. Наличие разнообразных факторов, влияющих на изменение распределения плотности энергии луча, приводит к тому, что однозначного соотношения между средним квадратическим отклонением электронов луча σ и диаметром электронного луча d как энергетической оценкой вносимой удельной мощности q_2 нет.

Помимо диаметра электронного луча, распределение плотности может быть охарактеризовано относительными коэффициентами, зависящими от формы распределения: контрэксцесса χ и энтропийного коэффициента k ,

могут быть использованы для идентификации закона распределения [4].

Для исследования параметров распределения плотности энергии электронного луча была разработана автоматизированная система исследования геометрических параметров распределения плотности энергии электронного луча (рис. 1).

Автоматизированная система состоит из двух основных блоков: канала управления лучом (КУЛ) и канала регистрации (КР).

Канал управления лучом осуществляет вывод луча из сварочной ванны и пересечение лучом зоны обзора датчика геометрии электронного луча D в прямом и обратном направлении. Сканирование луча производится по заранее заданным траекториям, хранимым в ЭВМ. Сигналы, управляющие электронным лучом, поступают с каналов А и В устройства управления положением луча (УУПЛ) в отклоняющие системы $ОС_x$ и $ОС_y$ через усилители постоянного тока УПТ. Канал С используется для синхронизации устройства регистрации (УР). В качестве УУПЛ используется цифровой двухканальный генератор сигналов произвольной формы АНР-3000 фирмы «АКТАКОМ», представляющий собой дополнительную ISA-плату к персональному компьютеру.

Технические характеристики генератора АНР-3000 следующие:

- количество каналов – 2;
- диапазон напряжений – 5...5 В (0...10 В);
- частота выходного сигнала – 20 МГц (1 канал), 10 МГц (2 канала);
- объем памяти – 2 048 точек на канал;
- разрешение – 8 бит;
- режимы работы: периодический, синхронизированный, внешний запуск, ручной запуск;
- синхронизатор – TTL-совместимый вход-выход.

Канал регистрации осуществляет измерение сигнала, поступающего с датчика, фиксирование его в памяти ЭВМ и отображение на экране монитора. Основным узлом канала является устройство регистрации. Запуск УР производится в начале каждого сканирования синхроимпульсом (СИ), поступающим на вход канала синхронизации Е. После запуска КР выполняет измерение сигнала, поступающего на вход канала А с датчика геометрии электронного луча D через предварительный усилитель (ПУ). Измеренный сигнал отображается на экране монитора и записывается в память ЭВМ. В качестве устройства регистрации используется двухканальный цифровой осциллограф АСК-3151 фирмы «АКТАКОМ» со следующими характеристиками:

- число каналов – 2;
- разрешение каналов – 8 бит;

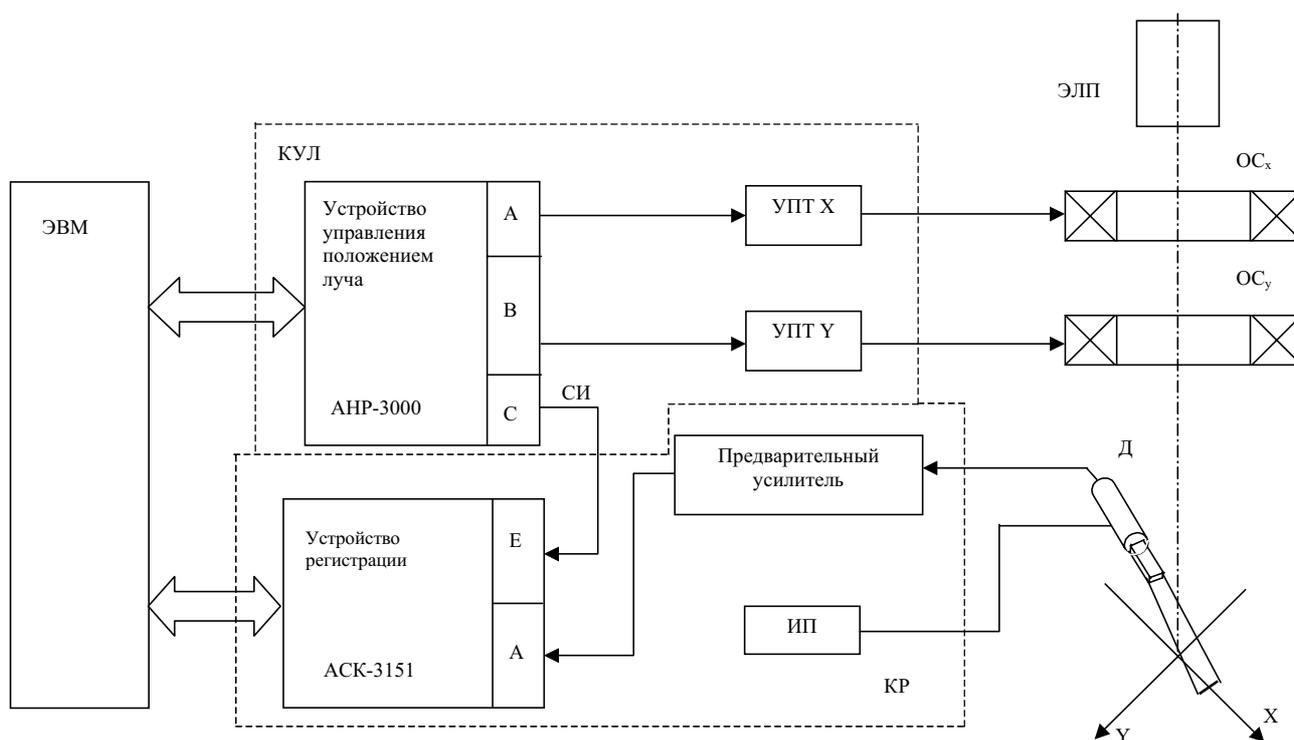


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы исследования геометрических параметров распределения плотности энергии электронного луча

- память – 32 Кбайта/канал;
- полоса пропускания – 150 МГц;
- развертка – 10 мВ/дел. ... 5 В/дел.;
- максимальное допустимое входное напряжение – ± 100 В;
- дополнительные функции: самописец; быстрое преобразование Фурье.

Осциллограф АСК-3151 выполнен в виде отдельного блока. Для связи с персональным компьютером используется параллельный порт.

К работе устройств АНР-3000 и АСК-3151 к ЭВМ предъявляются следующие требования:

- IBM PS совместимый компьютер на базе процессора Pentium II 233 МГц и выше;
- ОЗУ минимум 16 Мб;
- 10 Мб дискового пространства;
- операционная система Windows 95/98.

В качестве датчика геометрии электронного луча используется коллимированный рентгеновский датчик (рис. 2).

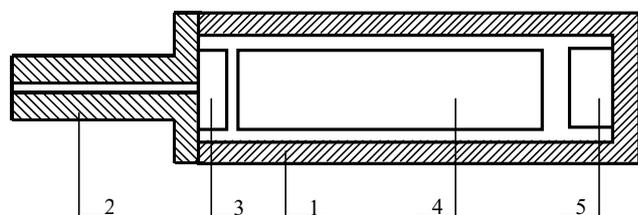


Рис. 2. Датчик геометрии электронного луча: 1 – корпус; 2 – коллиматор; 3 – сцинтиллятор; 4 – фотоэлектронный умножитель; 5 – предусилитель

Корпус датчика выполнен из материала, поглощающего рентгеновское излучение. Для ограничения зоны обзора рентгеновского датчика на его корпус надевается щелевая бленда, также выполненная из рентгенопоглощающих материалов.

Сцинтиллятор представляет собой цилиндр (или таблетку), внутри которого находятся кристаллы соли NaJ и CsJ, активированные таллием, CaF₂, BiGe₃O₁₂. Сцинтиллятор преобразует рентгеновское излучение в световые импульсы, интенсивность и частота которых пропорциональны мощности и жесткости рентгеновского излучения.

Фотоэлектронный умножитель предназначен для усиления световых импульсов, генерируемых сцинтиллятором, и их преобразования в электрический ток. Он состоит из полупрозрачного кремневого фотокатода, системы электростатической фокусировки электронов, диодной системы умножения с торцевым оптическим входом. Питание фотоэлектрического умножителя осуществляется высоковольтным источником питания (ИП).

В ходе проводимых экспериментов исследовались следующие геометрические параметры распределения:

- 1) энтропийная оценка ширины распределения плотности тока луча – энтропийный диаметр [5]

$$d_s = \exp(H(x)),$$

где $H(x)$ – энтропия распределения;

- 2) информационные признаки формы распределения плотности тока [4]:

- энтропийный коэффициент $k_s = \frac{1}{2\sigma} \exp(H(x))$;
- контрэксцесс $\chi = \sqrt{\frac{\sigma^4}{\mu_4}}$, где σ – среднее квадратическое отклонение распределения плотности тока электронного луча; μ_4 – четвертый центральный момент распределения плотности тока электронного луча.

Измерения проводились на установке ЭЛУ-5 с электронно-лучевой пушкой КЭП-2М и источником питания У-250. Амплитуда сканирования составляла 3,2 мм, число точек сканирования – 32. Перемещение луча из одной точки в другую соответствует 0,1 мм.

В ходе проведенных исследований были получены зондовые характеристики датчика геометрии электронного луча при различных токах фокусирующей системы I_ϕ . Для уменьшения влияния помех и нестабильности параметров сварки для каждого значения тока фокусирующей системы снималась серия измерений, состоящая из восьми реализаций, по которым строилась осредненная зондовая характеристика (рис. 3). Результаты расчета геометрических параметров распределения приведены в табл. 1. Реализация № 9 в каждой серии измерений является осредненной зондовой характеристикой.

Распределение значений контрэксцесса достаточно симметрично, в то время как распределение энтропийного коэффициента неравномерно и имеет максимум в диапазоне значений 1,9...2,1 (рис. 4).

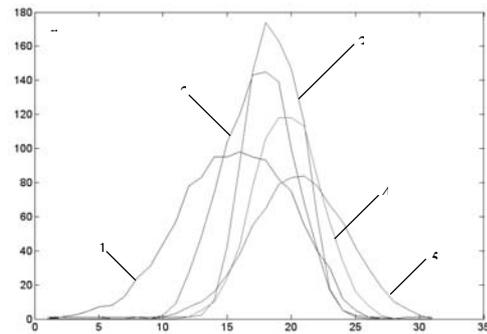


Рис. 3. Зондовые характеристики плотности тока электронного луча, соответствующие различным значениям тока фокусирующей системы: 1 – $I_\phi = 127$ мА; 2 – $I_\phi = 129$ мА; 3 – $I_\phi = 132$ мА; 4 – $I_\phi = 134$ мА; 5 – $I_\phi = 136$ мА

Таблица 1

Геометрические параметры, полученные по зондовым характеристикам датчика геометрии электронного луча

Номер серии	Номер реализации	Ток фокуса, мА	d_3 , мм	χ	k_3
1	1	0,127	1,768	0,574	2,003
	2		1,649	0,578	1,978
	3		1,724	0,600	2,011
	4		1,724	0,600	2,011
	5		1,664	0,573	1,984
	6		1,764	0,600	2,016
	7		1,709	0,561	2,008
	8		1,660	0,580	1,976
	9		1,701	0,585	2,006
2	1	0,129	1,155	0,483	2,006
	2		1,227	0,409	1,942
	3		1,160	0,467	2,003
	4		1,251	0,397	1,915
	5		1,225	0,387	1,914
	6		1,159	0,471	2,007
	7		1,173	0,439	1,978
	8		1,194	0,446	1,999
	9		1,162	0,442	1,986
3	1	0,132	0,957	0,339	1,633
	2		0,908	0,311	1,770
	3		0,939	0,376	1,684
	4		0,957	0,365	1,707
	5		0,882	0,465	1,727
	6		0,988	0,340	1,648
	7		0,863	0,599	1,791
	8		0,946	0,409	1,692
	9		0,953	0,377	1,700
4	1	0,134	1,123	0,422	1,864
	2		1,122	0,431	1,897
	3		1,213	0,379	1,869
	4		1,100	0,479	1,892
	5		1,102	0,448	1,891
	6		1,104	0,422	1,858
	7		1,261	0,386	1,842
	8		1,107	0,375	1,849
	9		1,082	0,473	1,917
5	1	0,136	1,540	0,600	2,003
	2		1,510	0,580	2,011
	3		1,514	0,526	1,938
	4		1,427	0,623	1,992
	5		1,572	0,509	1,983
	6		1,517	0,559	1,989
	7		1,517	0,559	1,989
	8		1,512	0,579	1,985
	9		1,499	0,597	2,006

Примечание. В табл. 1 применяются следующие условные обозначения: d_3 – энтропийный диаметр; χ – контрэксцесс; k_3 – энтропийный коэффициент.

Представим поле информационных признаков формы энтропийного коэффициента и контрэксцесса с нанесенными на него отображающими точками, соответствующими полученным зондовым характеристикам (рис. 5). На поле признаков кривой, проходящей через точки 1–2–3–4–5, соответствуют одномодальные экспоненциальные распределения. Точка 4 на данной кривой характеризует расположение нормального закона, точка 5 – расположение равномерного распределения, точка 3 – распределение Лапласа. Отображающие точки экспериментальных распределений, нанесенные на поле признаков, указывают на близость к одному из законов распределения, изображенных в виде линии, и позволяют отнести полученное экспериментальное распределение к одной из известных аналитических моделей распределений [4].

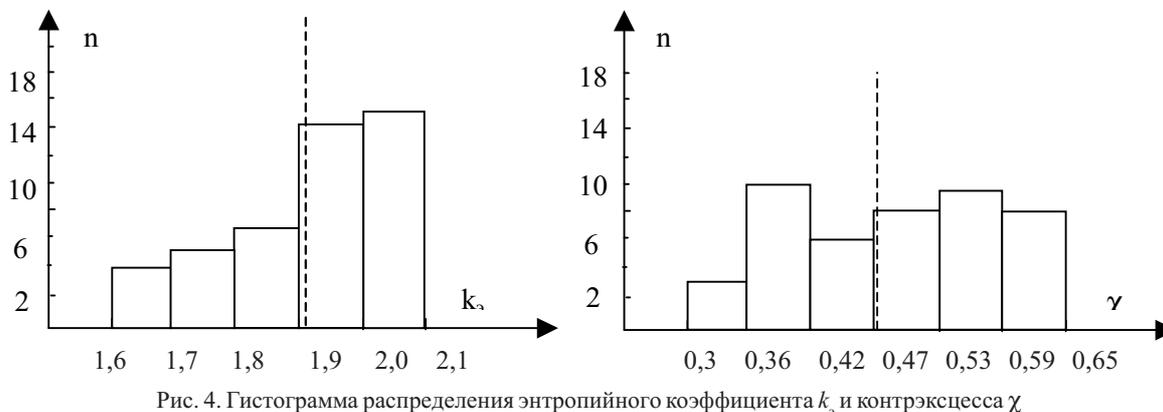


Рис. 4. Гистограмма распределения энтропийного коэффициента k_3 и контрэксцесса γ

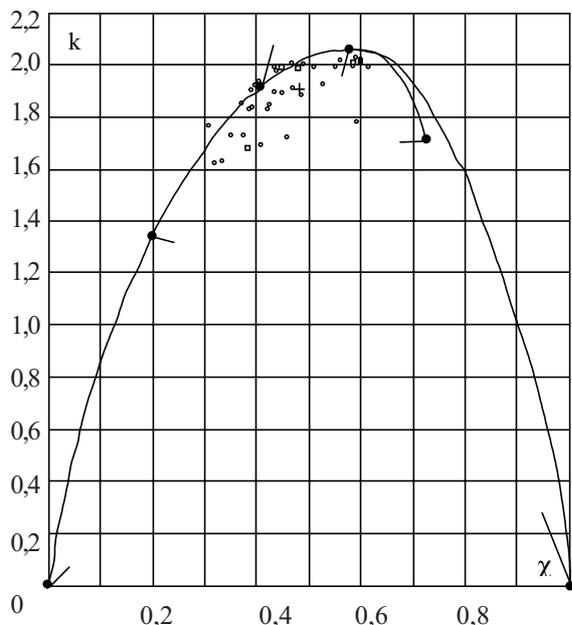


Рис. 5. Расположение экспериментально полученных распределений на плоскости признаков контрэксцесса и энтропийного коэффициента

Расположение точек показывает, что значения контрэксцесса γ находятся в пределах от 0,30 до 0,62, а значения энтропийного коэффициента – в пределах от 1,60 до 2,02. Вычисление средних значений энтропийного коэффициента и контрэксцесса для всех отображающих точек дает значение $k_3 = 1,91$ и $\gamma = 0,48$. Эти координаты помечены на рис. 5 прямым крестом. Все осредненные характеристики отмечены квадратом. Большая часть распределения не описывается нормальным законом, а близка к экспоненциальным распределениям.

В результате проведенных исследований была получена выборка геометрических параметров, характеризующих распределение плотности энергии электронного луча, т. е. энтропийный коэффициент, контрэксцесс и эн-

тропийный диаметр. Разброс значений каждого из параметров в полной мере может быть охарактеризован законом распределения плотности вероятности, или количественными характеристиками: среднеквадратическим отклонением и доверительной погрешностью.

Главным фактором, затрудняющим определение точности по законам распределения исследуемой величины, является относительно малая выборка экспериментальных данных, т. е. случайность возникновения различных значений случайной величины. Надежным путем преодоления этого разброса является увеличение объема полученных данных. Однако это не всегда возможно из-за условий проведения измерений. Поэтому все усилия направлены на то, чтобы получить параметры распределения по малой случайной выборке. При этом опираются на максимальное использование априорной информации о виде распределения, заключающейся в том, что кривая плотности распределения предполагается плавной и симметричной.

Для вычисления среднего квадратического отклонения δ выборки значений энтропийного коэффициента, контрэксцесса и энтропийного диаметра воспользуемся следующим выражением:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_n)^2}{n - 1}},$$

где n – объем выборки случайной величины; X_n – координата центра распределения; x_i – значение случайной величины.

Перейдем от среднего квадратического отклонения к доверительной погрешности $\pm \Delta$, определяющей интервал, в котором действительное значение измеряемой величины будет находиться с заданной доверительной вероятностью. Значение доверительной погрешности можно выразить в долях среднеквадратического отклонения δ для различных значений доверительной вероятности. При этом данное соотношение зависит от закона распределения. Доверительная погрешность $\Delta_{0,9}$, определяющая интервал для доверительной вероятности $P_d = 0,9$, обладает

уникальным свойством: для широкого класса наиболее употребительных законов только она имеет однозначное соотношение со среднеквадратичным отклонением в виде $\Delta_{0,9} = 1,6\delta$.

Последовательность вычисления погрешности по экспериментальным данным следующая:

1. Для каждой отдельной реализации из серии измерений (табл. 1) определяют значения геометрических параметров: контрэксцесса χ , энтропийного коэффициента k_3 и энтропийного диаметра d_3 .

2. Производят статистическую обработку полученных выборок значений контрэксцесса, энтропийного коэффициента и энтропийного диаметра и определяют среднее квадратическое отклонение для каждой выборки.

3. Вычисляют доверительную погрешность $\Delta_{0,9}$.

Результаты расчета погрешности контрэксцесса χ , энтропийного коэффициента k_3 и энтропийного диаметра d_3 для пяти экспериментальных серий (каждая серия состоит из восьми реализаций) представлены в табл. 2, 3. ($\Delta_{\text{отн}}(\chi)$, $\Delta_{\text{отн}}(k_3)$, $\Delta_{\text{отн}}(d_3)$ – относительные погрешности).

Как видно по расчету погрешности, точность измерения геометрических параметров электронного луча является вполне удовлетворительной. Однако точка, соответствующая острому фокусу, оказалась наиболее подверженной воздействию случайных помех, исказивших результаты измерения.

В заключение сделаем следующие выводы:

– для уменьшения влияния помех расчет геометрических параметров следует производить по усредненным зондовым характеристикам, полученные параметры распределения по отдельным реализациям использовать для оценки точности проведенных измерений;

– большинство полученных распределений не описываются нормальным законом, а близки к экспоненциальным распределениям;

– точка, соответствующая острому фокусу, наиболее подвержена воздействию факторов, искажающих результаты измерения.

Библиографический список

1. Рыкалин, Н. Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин, И. В. Зуев, А. А. Углов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
2. Panten, M. Diagnosis of high energy density electron beam on electron beam welding machines with a new compact measuring equipment / M. Panten, F. Eichhorn, B. Spies // 4^{eme} Collog. int. coudage et fusion faisceau electrons et laser. Cannes, 26–30 sept. 1988. Vol. 1. Saclay. 1988. P. 53–60.
3. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин, В. Я. Браверманн; САА. Красноярск, 2000. 234 с.
4. Мурыгин, А. В. Анализ формы распределения плотности энергии в поперечном сечении электронного луча при ЭЛС / А. В. Мурыгин, А. Н. Бочаров // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева: сб. науч. тр. / под ред. проф. Г. П. Белякова; СибГАУ. Красноярск, 2004. Вып. 5. С. 231–235.
5. Мурыгин, А. В. Расчет геометрических параметров электронного луча при ЭЛС / А. В. Мурыгин, А. Н. Бочаров // Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика: сб. науч. тр. / под общ. ред. В. В. Стацуры; ГУЦМиЗ. Красноярск, 2004. Вып. 10. Ч. 1.

Таблица 2

Значения погрешностей контрэксцесса χ , энтропийного коэффициента k_3 , полученные по экспериментальным данным

Номер серии	Ток фокуса, мА	$\delta(\chi)$	$\Delta_{0,9}(\chi)$	$\Delta_{\text{отн}}(\chi)$, %	$\delta(k_3)$	$\Delta_{0,9}(k_3)$	$\Delta_{\text{отн}}(k_3)$, %
1	0,127	0,00024	0,00038	0,07	0,00025	0,0004	0,02
2	0,129	0,034	0,054	12,3	0,036	0,058	2,9
3	0,132	0,088	0,14	35	0,051	0,082	4,8
4	0,134	0,038	0,062	14,8	0,025	0,04	2,1
5	0,136	0,035	0,056	9,8	0,021	0,033	1,7

Таблица 3

Значения погрешности энтропийного диаметра d_3 , полученные по экспериментальным данным

Номер серии	Ток фокуса, мА	d_3 , мм	$\delta(d_3)$, мм	$\Delta_{0,9}(d_3)$, мм	$\Delta_{\text{отн}}(d_3)$, %
1	0,127	1,701	0,01876	0,03	1,8
2	0,129	1,162	0,0576	0,072	6
3	0,132	0,953	0,064	0,0802	8,9
4	0,134	1,082	0,0604	0,0966	8,8
5	0,136	1,499	0,038	0,0615	4

A. N. Bocharov, A. V. Murygin

EXPERIMENTAL RESEARCH GEOMETRICAL PARAMETERS OF ELECTRON BEAM

Research of geometrical parameters of energy distribution density in section of electron beam has been performed. To perform research automatic system was created.

В. Я. Браверман, В. С. Белозерцев, А. Н. Успенский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

Приведены описания и результаты некоторых экспериментов по изучению рентгеновского излучения, возникающего при электронно-лучевой сварке. Исследования проводились с целью определения взаимосвязи излучения с процессом формирования сварного шва и использования излучения для управления сваркой.

Физико-технологические особенности электронно-лучевой сварки (ЭЛС) обуславливают ее возрастающий объем в общем объеме сварки по мере совершенствования конструкций и повышения эксплуатационных и весовых характеристик узлов и изделий в целом. Однако сложность и многофакторность этого вида сварки приводят к тому, что многие задачи обеспечения требуемого качества сварного шва должны решаться непосредственно в процессе сварки с помощью технических средств управления формированием сварного шва.

Для управления технологическими процессами и, в частности, ЭЛС целесообразно использовать сопутствующие явления в качестве информационных сигналов о процессе. Для управления ЭЛС применимы излучения в радио-, СВЧ-, световом и рентгеновском диапазонах, вторичная эмиссия заряженных частиц, однако такое явление, как рентгеновское излучение (РИ) из зоны сварки, обладающее очевидной информационной насыщенностью, оказывается мало изученным с точки зрения его использования для управления формированием сварного шва. При этом по сравнению с другими сопутствующими ЭЛС явлениями, РИ наименее подвержено влиянию помех. Некоторые сведения о характеристиках рентгеновского излучения при ЭЛС и их корреляции с процессом разрозненны, не систематизированы и даже противоречивы [1; 2], что затрудняет обоснованное применение этого явления для управления формированием сварного шва.

Определение эффективного коэффициента ослабления. Необходимость экспериментального определения этого коэффициента связана с трудностью точного представления коэффициента ослабления μ , зависящего от свариваемого материала, частоты ν или длины волны λ рентгеновского излучения.

На основании измерений различными исследователями для массового коэффициента поглощения получены приближенные формулы вида [3]:

$$\frac{\tau}{\rho} = C \frac{Z^n}{A} \lambda^m,$$

λ – длина волны; Z – атомный номер; A – атомный вес поглощающего вещества; m , n и C – постоянные. Так, по измерениям Алена,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau}{\rho} &= 0,0132 \frac{Z^4}{A} \lambda^{2,92} && \text{для } \lambda < \lambda_k \\ \frac{\tau}{\rho} &= 0,0018 \frac{Z^4}{A} \lambda^{2,92} && \text{для } \lambda > \lambda_k \end{aligned} \right\}$$

где λ_k – длина волны, при которой возникает скачок поглощения (k – граница поглощения). По данным Вальтера,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau}{\rho} &= 0,0160 \frac{Z^{3,94}}{A} \lambda^3 && \text{для } \lambda < \lambda_k \\ \frac{\tau}{\rho} &= 0,00522 \frac{Z^{4,3}}{A} \lambda^3 && \text{для } \lambda > \lambda_k \end{aligned} \right\}$$

Приведенные выше формулы, а также справочные данные о значениях массового коэффициента ослабления μ_m применимы в случае монохроматического излучения. При ЭЛС возникает рентгеновское излучение с непрерывным спектром, граничная (минимальная) длина волны которого определяется значением ускоряющего напряжения. В связи с этим имеется необходимость экспериментального определения эффективного коэффициента ослабления.

Измеряя интенсивность J_x пучка лучей, прошедших через слой какого-либо вещества, можно построить кривую $(J_x/J_0) = f(x)$, представляющую собой изменение интенсивности J_x в зависимости от глубины x проникновения рентгеновских лучей в поглощающее тело (здесь J_0 – интенсивность источника излучения). Эта зависимость получится более простой, если по оси ординат откладывать не J_x/J_0 , а $\ln(J_x/J_0)$, так как в этом случае получается прямая линия. Действительно, интенсивность J_x излучения, проникающего через слой x вещества, определяется известным выражением [3]

$$J_x = J_0 \exp(-\mu x). \quad (1)$$

Логарифмируя (1), имеем: $\ln J_x = \ln J_0 - \mu x$ или $\ln \frac{J_x}{J_0} = -\mu x$.

Наклон этой прямой дает меру коэффициента ослабления (рис. 1):

$$\mu = \operatorname{tg} \varphi, \quad \text{где } \operatorname{tg} \varphi = \frac{\ln \frac{J_{x1}}{J_0}}{x_1} = \frac{\ln \frac{J_{x2}}{J_0}}{x_2} = \frac{\ln \frac{J_{x2}}{J_0} - \ln \frac{J_{x1}}{J_0}}{x_2 - x_1}.$$

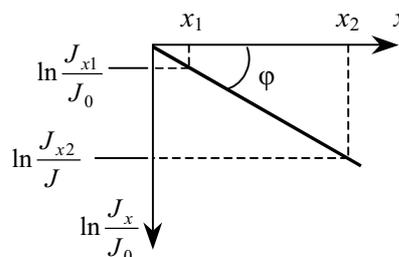


Рис. 1. К определению коэффициента линейного ослабления

Исследования проводились на установке ЭЛУ-9 с электронно-лучевым оборудованием ЭЛА 60/60 ($U_{\text{уск}} = 60$ кВ) и У-250АМ ($U_{\text{уск}} = 30$ кВ). С помощью манипулятора (рис. 2)

образец в приспособлении перемещается относительно электронного луча. Датчик перемещения ДДР-8 формирует 512 импульсов на один оборот. Механическая передача между приспособлением и датчиком перемещения подобрана таким образом, чтобы импульсы с датчика следовали через 0,25 мм перемещения образца, что соответствует изменению толщины образца на 0,005 мм. Первый

импульс датчика перемещения фиксировался по сигналу фотодатчика (на рис. 2 не показан), когда образец перекрывал соответствующий световой канал.

Алгоритм преобразования построен таким образом, что измерения начинались с толщины $x = 0,1$ мм (когда образец перемещался на 5 мм или на 20 импульсов). С 20-го импульса и далее измерения производились с при-

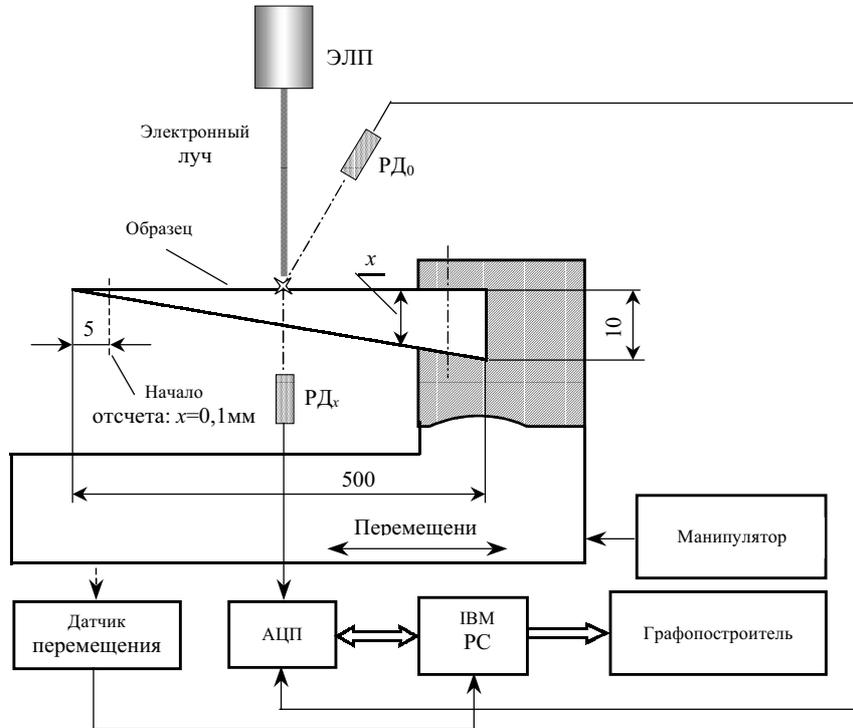


Рис. 2. Схема эксперимента по определению коэффициента ослабления μ :

ЭЛП – электронно-лучевая пушка; РД₀ – рентгеновский датчик неослабленного излучения; РД_x – датчик проникающего излучения; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ходом каждого импульса, т. е. через каждые 0,005 мм изменения толщины образца. Длина образца, на котором производились измерения, составляла 450 мм или 1 800 импульсов, что соответствовало диапазону толщин 0,1...9,1 мм. Перед измерениями датчики тарировались таким образом, чтобы показания их были одинаковыми при регистрации неослабленного рентгеновского

излучения J_0 . Сигналы датчиков с помощью АЦП преобразовывались в цифровую форму и передавались в контроллер на базе ИВМ РС, в котором вычислялись отношение J_x / J_0 , логарифм этого отношения и $\text{tg } \varphi = \mu \text{ см}$. Для наглядности и документирования информации результаты измерений и вычислений выводились на монитор контроллера и графопостроитель.

Результаты экспериментов по определению μ для сплава АМг-6

$U_{\text{уск}}, \text{кВ}$	$x, \text{мм}$	J_x / J_0	$\ln (J_x / J_0)$	$\mu, \text{м}^{-1}$
30	0,1	0,9854	-0,0147	≈ 147
	0,5	0,9291	-0,0735	
	1	0,8633	-0,1470	
	3	0,6434	-0,4500	
	5	0,4795	-0,7350	
	7	0,3574	-1,0290	
	9	0,2663	-1,3230	
	9,1	0,2624	-1,3377	
	60	0,1	0,9933	
0,5		0,9671	-0,0335	
1		0,9352	-0,0670	
3		0,8179	-0,2010	
5		0,7153	-0,3350	
7		0,6256	-0,4690	
9		0,5472	-0,6030	
9,1		0,5435	-0,6097	

Графики изменения J_x / J_0 и $\ln(J_x / J_0)$ от x (рис. 3) приведены для качественной оценки изменения этих величин в зависимости от пути, пройденного рентгеновскими лучами в материале, и от ускоряющего напряжения. При расчете коэффициента ослабления значения соответствующих величин брались из таблицы.

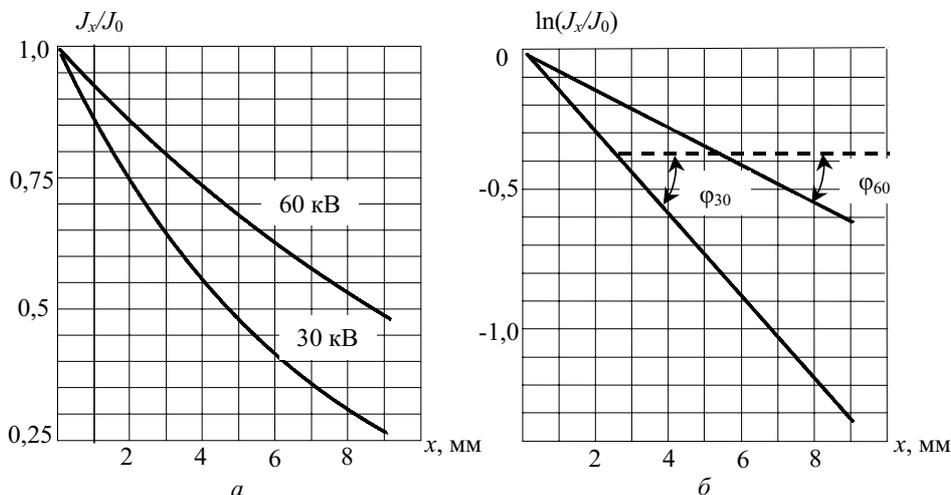


Рис. 3. Результаты эксперимента: а – зависимости $J_x / J_0 = f(x)$; б – зависимости $\ln(J_x / J_0) = f(x)$

ваться как массивные мишени, и рентгеновское излучение, возбужденное в них, имеет распределение, близкое к сферическому. Отклонение этого распределения от сферического связано с наличием поверхностей свариваемых элементов, расположенных под различными углами к направлению падения сварочного пучка электронов. Характер зависимости интенсивности рентгеновского излучения от угла падения электронного луча на свариваемые поверхности представляет практический интерес. С этой целью был проведен эксперимент (рис. 4).

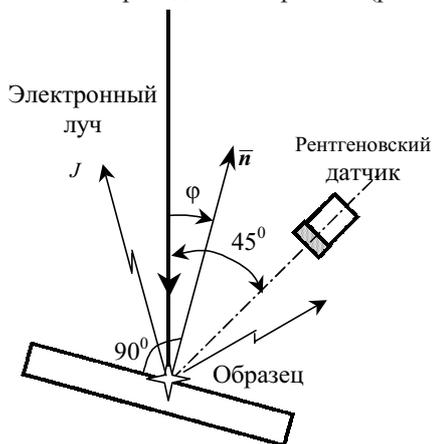


Рис. 4. Схема эксперимента по определению зависимости интенсивности рентгеновского излучения от угла падения луча на свариваемые детали

Испытуемый образец с полированной поверхностью устанавливался на манипулятор вращения таким образом, чтобы плоскость образца совпадала с осью вращения манипулятора. Датчик рентгеновского излучения устанавливался под углом 45° к направлению падения луча. В качестве датчика использовался блок детектирования сцинтиляционный БДС-6, в состав которого входят сцинтиляционный детектор на основе NaJ(Tl) типа

В результате многократных экспериментов было определено, что для $U_{\text{уск}} = 60 \text{ кВ}$ $\mu = 67 \text{ м}^{-1}$, для $U_{\text{уск}} = 30 \text{ кВ}$ $\mu = 147 \text{ м}^{-1}$.

Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от угла падения электронного луча на свариваемые детали. При ЭЛС свариваемые детали могут рассматри-

СДН.03.02, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-85 с делителем напряжения и предусилителем импульсов. Ток пучка электронов устанавливался таким, чтобы не было оплавления поверхности образца (1 мА при ускоряющем напряжении 60 кВ). В процессе эксперимента измерялась интенсивность рентгеновского излучения через каждые 5° поворота образца (рис. 5). Относительные значения получены делением действительных на максимальное, измеряемое при $\psi = 0^\circ$.

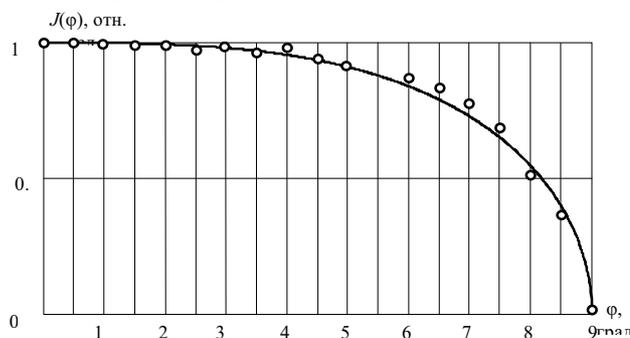


Рис. 5. Зависимость интенсивности РИ от угла между направлением электронного луча и нормалью к поверхности свариваемых деталей в относительных единицах: о – обработанные результаты эксперимента; — – аппроксимирующая кривая

Данные эксперимента с достаточной точностью описываются выражением

$$f(\alpha) = \left(1 - \frac{|\alpha^3|}{90^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

при изменении α от 0 до $\pm 90^\circ$.

Угловое распределение проникающего рентгеновского излучения. Исследования проводились для определения оптимального расположения датчика проникающего рентгеновского излучения в целях его использования

для контроля процесса ЭЛС. Зависимость интенсивности проникающего рентгеновского излучения от направления его распространения может быть получена аналитически по формуле (1). При изменении угла наблюдения изменяется и толщина X слоя металла, через который проходит регистрируемое рентгеновское излучение по закону

$$X = x / \cos \theta,$$

где x – минимальная толщина при $\theta = 0^\circ$ (рис. 6). В связи с этим интенсивность проникающего рентгеновского излучения изменяется по формуле:

$$J_\theta = J_0 \exp\left(-\frac{\mu x}{\cos \theta}\right). \quad (2)$$

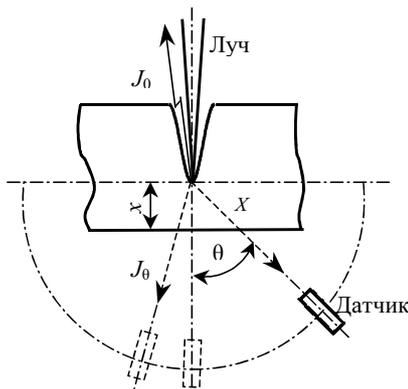


Рис. 6. К определению зависимости $J = f(\theta)$

Ниже представлены результаты исследования углового распределения проникающего рентгеновского излучения для сплава АМг-6. Исследования проведены в двух режимах: при отсутствии проплавления ($I_{\text{пл}} = 5$ мА, $U_{\text{уск}} = 30$ кВ) и при сварочном токе ($I_{\text{пл}} = 230$ мА, $U_{\text{уск}} = 30$ кВ).

С помощью манипулятора (рис. 7) рентгеновский датчик вращался вокруг оси OO , лежащей в плоскости нижней поверхности образца. Сигнал с датчика регистрировался по схеме, показанной на рис. 2. При сварочном токе образец дополнительно перемещался (плоскопараллельное перемещение) со скоростью, обеспечивающей величину непроплава $x \approx 5$ мм (глубина проплавления ≈ 25 мм). Вращение датчика осуществлялось в пределах $\pm 70^\circ$ (из-за конструктивных ограничений). Для получения требуемых зависимостей в относительных единицах текущие значения сигнала датчика делились на среднее значение максимальных показаний при $\theta = 0^\circ$. По результатам экспериментов видно (рис. 8), что при малом токе луча (при отсутствии проплавления) (рис. 8, а) характер исследуемой зависимости с достаточной точностью может быть представлен выражением (2). При сварочном токе (рис. 8, б) имеются значительные колебания проникающего рентгеновского излучения. Это связано с нестабильностью положения луча, являющейся результатом гидродинамических процессов в канале проплавления.

Эксперименты подтвердили расчетный характер углового распределения проникающего рентгеновского излучения. Кроме того, частота колебаний интенсивности излучения (≈ 60 Гц) коррелирует с частотами гидродинамических процессов, регистрируемыми по другим вторичным излучениям (например, по ионному току). Вы-

сокочастотные составляющие, связанные с пародинамическими процессами, в канале не наблюдались. Это можно объяснить малой плотностью паров по сравнению с плотностью основного металла. И если электроны луча тормозятся на парах, то излучение, прошедшее через них, практически не ослабляется.

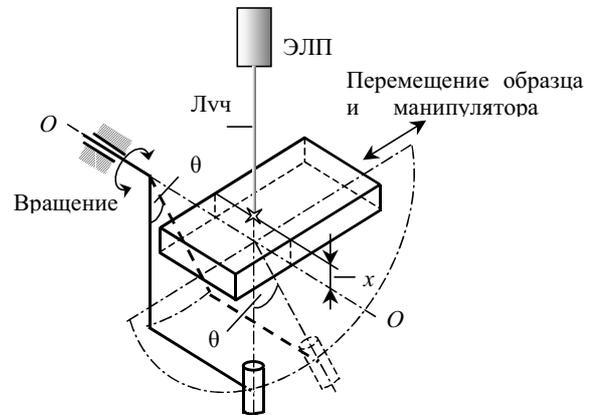


Рис. 7. Схема эксперимента по определению $J_x(\theta)$

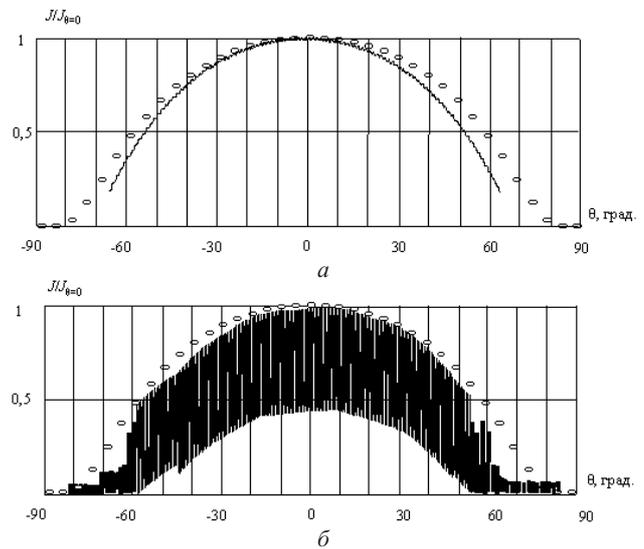


Рис. 8. Результаты эксперимента: а – $I_{\text{пл}} = 5$ мА; б – $I_{\text{пл}} = 230$ мА

Заключение. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- зависимость интенсивности рентгеновского излучения от конструктивных особенностей свариваемых объектов и от параметров сварки свидетельствует о возможности использования РИ в качестве информационного сигнала о процессе;
- предложенная методика определения коэффициента линейного ослабления рентгеновского излучения, прошедшего слой материала, позволяет простыми техническими средствами находить этот коэффициент экспериментально, расширяя базу данных о значениях коэффициента ослабления для различных материалов и ускоряющих напряжений, и использовать эти данные в других областях научных исследований;
- данные о пространственных характеристиках РИ позволяют оптимизировать положение датчиков для наиболее эффективной регистрации излучения в процессе ЭЛС.

Библиографический список

1. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лап-
тенко, А. В. Мурыгин, С. Н. Серегин, В. Я. Браверман; САА.
Красноярск, 2000. 234 с.

2. А. с 1504041 СССР, МКИ³ В 23 К 15/00. Способ стаби-
лизации глубины проплавления в процессе лучевой свар-

ки по рентгеновскому излучению / А. А. Солнцев. Оpubл.
30.08.89, Бюл. № 32.

3. Хараджа, Ф. Н. Общий курс рентгенотехники /
Ф. Н. Хараджа. М.: Энергия, 1966. 568 с.

V. Ja. Braverman, V. S. Belozertsev, A. N. Uspenskij

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF X-RAY RADIATION
DURING ELECTRON BEAM WELDING**

Descriptions and results of studying experiments on X-ray radiation that appears during electron beam welding are given in the article. Research are held mainly to define correlation between radiation and the process of welded seam forming and possible use of radiation for welding control.

Я. И. Бульбик, Т. Т. Ереско, С. И. Трегубов, И. И. Хоменко

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛНОВОДА МАЛОГО СЕЧЕНИЯ

Приводится сравнительный анализ способов изготовления волноводов малого прямоугольного сечения для применения в спутниковой связи. Предложен способ формирования проводящего покрытия внутренней поверхности волновода, конструкционным материалом которого является углеродистый пластик.

Развитие спутниковой связи миллиметрового диапазона выдвигает ряд технологических задач формирования соответствующих электромагнитных направляющих систем, в частности прямоугольных волноводов с сечениями внутренней полости 3,6×1,8; 2,4×1,2 мм и др. Наиболее приемлемой для указанных направляющих систем является двухслойная конструкция, в которой внешний слой (несущая конструкция) изготавливается из легкого и прочного материала, обеспечивающего стабильные геометрические параметры, а проводящий слой внутренней полости формируется из немагнитного материала с высокой электропроводностью (медь, латунь, серебро).

Качество проводящего покрытия оценивается по вносимому затуханию, зависящему от величины активной составляющей поверхностного сопротивления R_s , которая обратно пропорциональна электропроводности и глубине проникновения электромагнитного поля в покрытие. Кроме того, R_s зависит также от параметра шероховатости R_a , величина которого не должна превышать половинного значения от глубины проникновения электромагнитного поля в покрытие. С уменьшением длин миллиметрового диапазона волн растет поглощение излученной СВЧ-энергии в атмосфере, что позволяет использовать это явление в оценке толщины озонового слоя и мониторинга степени загрязнения атмосферы промышленными газами как источника роста парникового эффекта. Переход к малым длинам волн также создает возможности для уменьшения веса и габаритных размеров бортовой радиотехнической аппаратуры, что соответствует современной концепции развития спутниковых систем [1].

Основной целью данной статьи является экспериментальное исследование потенциально пригодного способа формирования проводящего покрытия внутренней поверхности волноводных секций малого сечения на основе сравнительного анализа существующих технических решений.

Проведенный патентный поиск выявил ряд способов и устройств, направленных на решение проблемы нанесения токопроводящих и других (декоративных, защитных и пр.) покрытий на внутренние поверхности трубчатых изделий.

Например, известный способ изготовления волноводов, где проводящим слоем является металлическая фольга [2], осуществляется следующим образом. Ленту металлической фольги, подаваемую в продольном направлении, формируют в цилиндрическую заготовку любого сечения, затем производят отбортовку кромок цилиндрической заготовки, соединяют их дуговой сваркой в атмосфере защитного газа, после чего полученное ребро отгибают к поверхности цилиндрической заготовки.

Полученная в соответствии с предлагаемым способом цилиндрическая заготовка имеет внутреннюю зеркальную поверхность, поэтому вполне пригодна для канализации СВЧ-энергии.

На наружную поверхность цилиндрической заготовки последовательно наносят двухслойное защитное покрытие, причем в качестве первого слоя используют сополимер полиэтилена, обогащенный мономером, а в качестве второго слоя – полиэтилен. Тонкая металлическая лента, покрытая двухслойным защитным покрытием, приобретает требуемую механическую прочность, обеспечивающую сохранение приданной ей формы и при значительных механических перегрузках и изгибах. В качестве материала для фольги используют медь или алюминий.

Изготовленный предлагаемым способом волновод при высокой устойчивости формы легко гнется и может быть намотан на барабан, транспортируется без затруднений и прокладывается без больших затрат. Благодаря высокой гибкости он может быть приспособлен к требуемым изгибам по разным радиусам, без изменения качества внутренней поверхности, которая является направляющей системой для электромагнитных волн. Этот способ позволяет изготавливать волновод непрерывной длины и обеспечивает минимальные потери при канализации СВЧ-энергии.

Основным недостатком данного способа является сложность получения медной или алюминиевой фольги, полностью удовлетворяющей перечисленным выше требованиям, предъявляемым к проводящему покрытию волновода малого сечения. Производство фольги сопровождается большим количеством дефектов [3], к которым относятся поверхностные тональные полосы, которые ухудшают качественные показатели готовой продукции.

Известен способ изготовления волновода [4], принимающий рабочую форму поперечного сечения под избыточным давлением газа-наполнителя (рис. 1, 2). Волновод состоит из двух основных металлополимерных лент 1, 2 и двух дополнительных металлополимерных лент 3, 4, которые расположены на наружной поверхности основных металлополимерных лент 1, 2 в месте стыка. Основные и дополнительные металлополимерные ленты соединены сварными швами.

Волновод изготавливается следующим образом. Две основные металлополимерные ленты 1, 2 укладывают одну на другую легкоплавкими диэлектрическими слоями наружу, их края огибают дополнительными металлополимерными лентами 3, 4, уложенными легкоплавкими слоями внутрь, при этом их края располагают в одной плоскости. Затем проводят сварку основных и дополни-

тельных металлополимерных лент 1...4 путем их протягивания через сварочное устройство, вследствие чего вдоль краев основных и дополнительных металлополимерных лент 1...4 образуется сварочный шов, соединяющий их между собой. Недостатком данного способа является сложность изготовления волновода малого сечения.

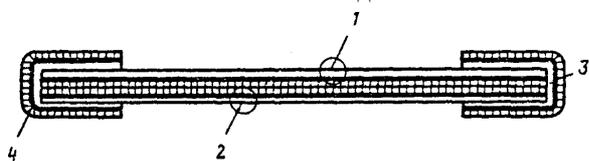


Рис. 1. Схема укладки металлополимерных лент

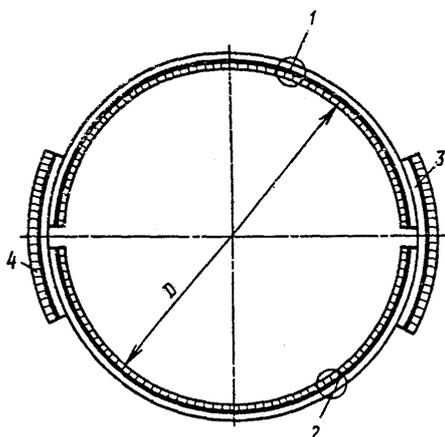


Рис. 2. Волновод под воздействием газа-наполнителя

Разработан способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубчатого сечения посредством детонационного напыления [5].

Детонация представляет собой взрыв, распространяющийся с постоянной и максимально возможной для данного взрывчатого вещества и данных условий скоростью, превышающей скорость звука в данной среде. Если смесь газов, заключенная в трубе – стволе, поджигается с одной стороны (с помощью электрической искры или взрывчатого вещества), то фронт пламени распространяется вдоль ствола с возрастающей скоростью до тех пор, пока в газе не возникнет детонационная волна, скорость распространения которой составляет 2...4 км/с. Напыляемому порошку (определенную дозу порошка заранее вводят в ствол) полученным в результате детонационного горения газовой смеси высокоскоростным потоком придают необходимое ускорение и наносят его в виде покрытия на изделие, устанавливаемое на пути потока газов и порошка. Скорость движения частиц напыляемого порошка составляет 600...1 000 м/с. К преимуществам этого метода следует отнести то, что высокие скорости напыляемых частиц позволяют получать покрытия высокого качества: прочность сцепления при отрыве достигает 200 МН/м²; плотность детонационных покрытий в большинстве случаев $\geq 98\%$; нагрев напыляемого изделия умеренный (обычно $\leq 250\text{ }^\circ\text{C}$); покрытия могут быть нанесены на изделие с твердостью $< 60\text{ RC}$.

Известен способ нанесения металлических покрытий на внутреннюю поверхность полых изделий методом электрического взрыва проводника [6]. Установка для нанесения покрытий взрывом проводника, содержащая механизм подачи проволоки с направляющими, источник

питания и систему токоподвода с электродами, снабжена высоковольтным трансформатором, подключенным к проволоке и электродам, а электроды выполнены в виде глобоидальных роликов, установленных с возможностью вращения. Установка работает следующим образом: полую деталь помещают в механизм для закрепления изделия так, чтобы ось ее симметрии совпала с осью проволоки, затем подают напряжение от трансформатора на проволоку и электроды. Пространство между электродом и проволокой ионизируется и пробивается разрядом от источника импульсного тока. Ток, проходя через проволоку, расплывает ее, и покрытие наносится на поверхность детали.

Недостатками данных способов является затрудненное напыление внутренних поверхностей малого сечения.

Имеется способ изготовления волновода, имеющего прямоугольное сечение [7]. Способ относится к технике СВЧ и может быть использован при изготовлении волноводов, в частности волноводов малого сечения. Его целью является упрощение технологии изготовления и обеспечение возможности варьирования одним из размеров прямоугольного волновода. Прямоугольный волновод изготавливают из двух частей, выполняемых из заготовки Г-образного сечения (рис. 3), внутренний размер одной из сторон которой равен размеру одной из стенок прямоугольного волновода. При соединении частей другой размер прямоугольного волновода изменяется и может устанавливаться с помощью калибра или путем измерения и перемещением (рис. 4). Использование этого способа изготовления волновода имеет ограниченное применение – только для прямых секций.

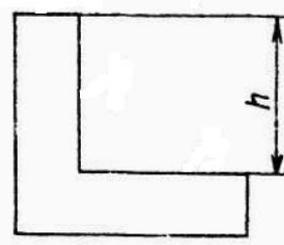


Рис. 3. Заготовка Г-образного сечения

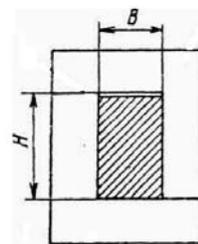


Рис. 4. Волновод в сборе

В настоящее время основным методом получения проводящего покрытия на внутренней поверхности волноводов является гальванический метод.

Найден способ изготовления волноводов [8], заключающийся в изготовлении заготовок 1 и покрытии их гальванической медью 2 толщиной 3...6 мкм и размещении их на диэлектрическом держателе (рис. 5). Целью этого способа является – снижение стоимости за счет исключения

покрытия драгоценными металлами и повышение производительности. Рабочие поверхности заготовок подвергаются облучению ионами аргона или неона, обладающими энергией в пределах 50...100 кэВ дозами $(1,2...3,0) \cdot 10^{16}$ см² с плотностью тока 0,2...0,8 мкА/см² при одновременном наложении ускоряющего напряжения 100...300 В. После этого проводится сборка волновода методом диффузионной сварки (рис. 6). Волновод, выполненный в соответствии с этим способом, обладает высокими электропроводностью на СВЧ и коррозионной стойкостью.

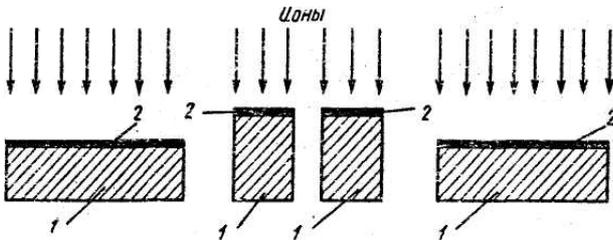


Рис. 5. Обработка рабочих поверхностей заготовок

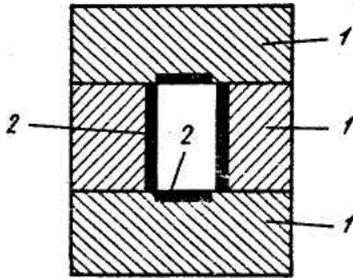


Рис. 6. Волновод в сборе

Данный способ относится к технике СВЧ и может быть использован при изготовлении волноводных трактов и устройств преимущественно миллиметрового диапазона длин волн.

Техническое решение, описанное в авторском свидетельстве [8], позволяет получить токопроводящее покрытие на внутренней поверхности волновода любого по размерам прямоугольного сечения, но сборка волновода производится методом диффузионной сварки, что отрицательно влияет на точность геометрических размеров сечения по длине волновода.

При относительной простоте гальваническому методу присущ и ряд недостатков:

- неравномерное распределение электролитических осадков по рельефной поверхности форм, затрудняющих изготовление деталей с острыми углами, углублениями и каналами;
- ограниченное число металлов и сплавов, которое можно использовать для изготовления деталей;
- относительно невысокая скорость осаждения металлов, которая делает процесс изготовления деталей довольно продолжительным;
- получение неравномерного покрытия при малой плотности тока;
- матовость и пригары на покрытии – при высокой плотности тока [9];
- образование темных полос и точек на покрытии при недостатке серной кислоты и большом выделении водорода на катоде;
- повышение шероховатости поверхности на два класса;

– низкая экологичность производства.

Кроме того, к недостаткам гальванического метода можно отнести возможность загрязнения покрытия реагентами, используемыми в электролитах, что снижает проводимость наносимого металла, а также высокую пористость при малых толщинах покрытий. Последнее, кроме увеличения удельного сопротивления, приводит к сорбции газов в покрытии. И, как отмечалось выше, именно данное обстоятельство и ограничивает применение гальванического метода при изготовлении волноводов, применяемых в условиях разреженной газовой среды или в вакууме. В связи с этим отметим, что частоте 75 ГГц на медном покрытии необходимо обеспечить малое значение параметра шероховатости $R_a \leq 0,12$ мкм при $R_s = 0,07$ Ом.

Альтернативными методами нанесения тонких пленок, удовлетворяющих поставленной задаче, являются методы вакуумного напыления. Интенсивность применения метода испарения и конденсации в вакууме за последние годы увеличилась. Это обусловлено универсальностью технологии, высокой производительностью процесса нанесения покрытий, малой энергоемкостью и рядом других преимуществ по сравнению с традиционными методами получения покрытий различного функционального назначения (гальваническим осаждением, плакированием и т. д.), экологически чистой технологией производства. Также одним из основных преимуществ метода испарения и конденсации в вакууме тонких проводящих пленок является низкая газонаполненность, что снижает время дегазации в рабочих условиях применения.

Произведенный обзор патентных и литературных источников выявил ряд технических решений, в которых получение проводящего покрытия осуществляется в вакууме [10; 11 и др.].

Устройство для нанесения покрытий в вакууме [10] содержит вертикальную камеру, испаритель в виде проволоки, расположенный по оси камеры, токоподводы и груз. Чтобы компенсировать термическое расширение с целью равномерного покрытия на внутренней поверхности труб путем предотвращения разрыва испарителя в период проведения процесса, это устройство оно снабжено стержнем, установленным параллельно испарителю, траверсами, соединяющими испаритель и стержень, и ограничителем, закрепленным на стержне, причем одна из траверс выполнена так, чтобы она могла перемещаться относительно стержня, а в ней смонтирован груз.

Технические решения [10; 11 и др.] не позволяют получить проводящее покрытие на внутренней поверхности волновода малого сечения (менее 10 мм), ввиду необходимости расположения внутри элементов технологической оснастки.

Проведенный анализ позволил предлагается способ изготовления волноводов, заключающийся в нанесении в вакууме проводящего слоя на оправку, последующим нанесением углепластика и удалением выплавляемой оправки. Способ позволяет получать проводящие покрытия, удовлетворяющие практически всем вышеперечисленным требованиям. Кроме того, он позволяет получить волноводы любой конфигурации.

Наибольшее распространение имеют проводящие покрытия из меди, алюминия и их сплавов. Серебро и

золото применяют в качестве проводников лишь в специальных случаях.

В качестве основного проводящего покрытия выбирается медь, так как она обладает хорошим сцеплением с различными металлами, а по электропроводности и теплопроводности медь уступает лишь серебру. В качестве защитного слоя используется серебро, оно стойко к окислению в различных средах.

На основании анализа существующих технологических процессов нанесения покрытий в вакууме и производственного опыта, накопленного в лаборатории вакуумной техники, предлагается следующий технологический маршрут:

- обработка поверхности оправки (модели);
- внутрикамерная обработка поверхности;
- нанесение проводящего покрытия;
- контроль поверхности;
- нанесение углепластика;
- удаление модели;
- окончательный контроль волноводной секции.

Обработка поверхности удаляемой модели. Внекамерная подготовка подложки к покрытию предназначена для удаления с поверхности подложки жиров, пыли и других загрязнений. Во время всех этапов работу производят в хлопчатобумажных перчатках при соблюдении мер безопасности.

Для предварительной очистки используем бензин Б-70 низкооктановый комнатной температуры, для удаления с поверхности подложки жиров и загрязнений, которые, как мы выяснили ранее, приводят к плохому сцеплению материалов основы и пленки.

Сушка производится в печи SUP-4 при температура $T = 60...70$ °С, время сушки $t = 45...60$ мин. Высушивание образцов осуществляется в специальной печи, оборудованной колпаком для предотвращения попадания микрочастиц пыли из воздуха.

Чистовая очистка парами изопропилового спирта производится для удаления микрочастиц с поверхности подложки. Время очистки $t = 10...15$ мин.

Высушивание образцов сушкой горячим воздухом ($T = 60...70$ °С; $t = 15...20$ мин) производится в специальной печи, оборудованной колпаком для предотвращения попадания микрочастиц пыли из воздуха.

Внутрикамерная обработка поверхности. Откачка вакуумной системы производится от атмосферного давления до $P = 5 \cdot 10^{-2}$ Па, $t \approx 20$ мин. Напуск рабочего газа (аргон), осуществляется для того, чтобы прошла очистка в среде тлеющего разряда. Давление в камере $P = 1$ Па.

Очистка в среде тлеющего разряда (давление в камере $P = 1$ Па, напряжение $U = 3000$ В, ток $I = 0,05$ А, время обработки $t \approx 5$ мин) происходит в камере для окончательной очистки материала подложки, в результате процесса частицы загрязнений оказываются распыленными по камере.

При прерывании подачи аргона проводят откачку вакуумной системы до давления $P = 5 \cdot 10^{-2}$ Па. Затем происходит удаление частиц из камеры ($t \approx 15$ мин).

Нанесение проводящего покрытия. Напуск рабочего газа, в качестве которого используется инертный газ аргон, осуществляется до давления $P = 1$ Па.

Процесс нанесения покрытия осуществляется подачей напряжения на катод. Давление в камере постоянное

($P = 1$ Па). Напряжение на катоде $U = 300$ В, ток $I = 7$ А. Скорость осаждения при данных параметрах $0,02$ мкм в мин. Общая толщина наносимого покрытия $0,5$ мкм (серебра $0,2$ мкм, меди $0,3$ мкм). Время нанесения покрытия $t \approx 25$ мин (уточняется после проведения экспериментов). Для получения равномерного проводящего слоя по всей поверхности подложки необходимо ее вращение вокруг своей оси, для чего вакуумная камера снабжена вакуумным вводом вращательного движения со скоростью вращения 2 об/мин.

Контроль поверхности. Контроль поверхности проводится по адгезии, толщине слоя, электропроводности покрытия на соответствие заданным требованиям.

В настоящее время произведен предварительный эксперимент, который дал удовлетворительные результаты, хотя технология проведения процесса требует отработки.

Экономический расчет показал, что себестоимость предлагаемого волновода в три раза меньше, чем волновода, изготовленного с применением гальванопластики.

Библиографический список

1. Malone, J. B. The Intelligent Synthesis Environment: A NASA Concept for the Engineering Design of Aerospace Systems in the Twenty-First Century / J. B. Malone, J. M. Housner, E. R. Generazio // Rev. of Progress in QNDE. Vol. 18A. 1999. P. 1–11.
2. А. с. 382314 СССР, М Кл. Н 01р 11/00. Способ изготовления волноводов / Р. Вегеле. № 1622548/26-9; заявл. 02.02.71; опубл. 22.05.73. Бюл. № 22.
3. Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика: сб. науч. тр. / под общ. ред. В. В. Стацур; ГУЦМиЗ. Красноярск, 2004. Вып. 10. Ч. 1. 246 с.
4. А. с. 1483532 СССР, Н 01 Р 11/00. Способ изготовления волноводов / Л. Г. Абрамович, В. В. Гинзбург, Г. К. Кондратьева. № 4298235/24-09; заявл. 17.08.87; опубл. 30.05.89, Бюл. № 20.
5. Зверев, А. И. Детонационное напыление покрытий / А. И. Зверев, С. Ю. Шаривкер, Е. А. Астахов. Л.: Судостроение, 1979. 232с.
6. А. с. 1675382 СССР, С 23 С 14/32. Установка для нанесения покрытий взрывом / П. И. Аштраускас. № 3670318/02; заявл. 05.12.83; опубл. 07.09.91, Бюл. № 33.
7. А. с. 1483532 СССР, Н 01Р 11/00. Способ изготовления волновода / Л. Г. Абрамович, В. В. Гинзбург, Г. К. Кондратьев, Ю. А. Седов. № 4298235/24-09; заявл. 17.08.87; опубл. 30.05.89, Бюл. № 20.
8. А. с. 1424081 СССР, Н 01Р 11/00. Способ изготовления волноводов / Б. Б. Козейкин, Б. Г. Грибов, Л. В. Катраев, А. И. Фролов, А. С. Чеботарев, Г. П. Гузнов, С. Л. Бугров. № 4200863/24-09; заявл. 26.02.87; опубл. 15.09.88, Бюл. № 34.
9. Вячеславов, П. М. Электролитическое формование / П. М. Вячеславов, Г. А. Волянюк. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. 198 с.
10. А. с. 457353 СССР, МКИ С 23 С 13/10. Устройство для нанесения покрытий в вакууме / В. С. Макеев, В. И. Титов, Ю. В. Чуриков. № 1926321/22-1; заявл. 25.05.73; опубл. 25.07.75, Бюл. № 27.

11. А. с. 1283880 СССР, МКИН 01 Р 11/00. Способ изготовления волноводов / А. И. Дубынин, Г. А. Аксельруд, С. В. Цеслив. № 3864023/24-09; заявл. 05.03.85; опубл. 15.01.87, Бюл. № 2.

Ya. I. Bulbik, T. T. Eresko, S. I. Tregubov, I. I. Khomenko

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHODS OF FORMATION CONDUCTING THE COATINGS OF INNER SURFACE OF THE WAVEGUIDE

Comparative Analysis of Conductive Coating Fabrication Methods for Inner Surface of Small Cross-section Waveguide. This paper concerns a comparative analysis of methods for the fabrication of waveguides at their rectangular small cross-sections designed for a satellite communication. A method of conductive coating fabrication on the carbon fiber-reinforced waveguide's inner surface is proposed.

В. Н. Ефремов, С. П. Мясников, Г. М. Абрамова

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОТВОДА ТЕПЛОТЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ 25 ДО 77 К

Приведены некоторые результаты работ, выполненных при разработке технического задания на создание устройства для отвода теплоты при проведении экспериментального исследования тепловых и электрических свойств новых материалов в магнитном поле в диапазоне температур от 25 до 77 К.

В практике физического эксперимента для получения температур существенно ниже температуры окружающей среды широко применяются устройства, в которых отвод теплоты от охлаждаемого объекта происходит за счет теплоты, поглощаемой при кипении жидкого азота или жидкого гелия. При давлении 101,325 кПа (760 мм рт. ст.) температура кипения азота 77,36 К, гелия 4,215 К. Температура кипения азота может быть снижена до 63,15 К за счет уменьшения абсолютного давления в емкости с кипящим азотом до давления тройной точки 12,53 кПа (94 мм рт. ст.) [1]. А температура кипения гелия может быть понижена до значения 2,172 К вакуумированием до абсолютного давления 5,036 кПа (37 мм рт. ст.) [2]. Таким образом, для охлаждения и термостатирования объектов, исследуемых в физическом эксперименте, кипящий азот и кипящий гелий могут быть использованы в качестве тепловых резервуаров с температурными уровнями от 63,15 до 77,36 К и от 2,172 до 4,215 К соответственно.

В диапазоне температур от 4,215 до 63,15 К может быть осуществлен отвод теплоты в тепловой резервуар температурного уровня 4,215 К (гелий, кипящий при атмосферном давлении). Недостатком этой схемы является повышенный расход гелия, так как затраты жидкого гелия на единицу отведенной теплоты не зависят от температурного уровня, с которого отводится теплота. Снизить расход гелия на единицу теплоты, отведенной с температурного уровня, существенно превышающего температуру кипения гелия, позволяет использование конструкций, в которых теплота, отводимая от охлаждаемого объекта, расходуется на испарение гелия и на нагревание

полученного при испарении газа до температуры ниже или равной (в идеальном случае) температуре охлаждаемого объекта. В качестве примера можно привести следующие данные: при атмосферном давлении теплота испарения гелия 20,3 кДж/кг, при температуре 25 К энтальпия гелия 147,7 кДж/кг, при температуре 4,215 К энтальпия газообразного гелия 30,4 кДж/кг [1]. Простой расчет показывает, что для отвода 1 МДж теплоты с температурного уровня 25 К испарением гелия понадобится 49,3 кг гелия, а при испарении с последующим нагреванием газа до 25 К за счет теплоты, отводимой от охлаждаемого объекта, необходимое количество гелия сократится до 7,3 кг, т. е. более чем в 6 раз.

Ниже приведен анализ затрат на отвод 1 МДж теплоты с температурных уровней 25, 40, 64, 80, 150 К различными способами (табл. 1). 1 МДж – это количество теплоты, которое при давлении 760 мм рт. ст. необходимо для испарения 394 л гелия или 6,3 л азота. Под холодильной машиной следует понимать машину, работающую по циклу Карно, обеспечивающую транспорт теплоты с заданного температурного уровня на температурный уровень 300 К и имеющую общий КПД 20 % (затраты оценены в киловатт-часах). Затраты на вакуумирование азота оценивались по условию адиабатного сжатия газа, имеющего температуру 300 К, от давления тройной точки азота 12,53 кПа до давления окружающей среды 101,325 кПа в вакуум-насосе, работающим с общим КПД 40 %. Оценка этих затрат составила 0,18 кВт·ч на 1 кг азота.

Приведенные в табл. 1 данные позволяют оценить экономическую эффективность различных способов охлаждения. При расчете примерной стоимости различных

Таблица 1

Затраты вещества и энергии на отвод 1 МДж теплоты с заданного температурного уровня при различных способах охлаждения

Способ охлаждения	25 К	40 К	64 К	80 К	150 К
Азотом, кипящим при давлении 101,325 кПа	–	–	–	5,04 кг	5,04 кг
Парами азота при давлении 101,325 кПа	–	–	–	4,96 кг	3,65 кг
Азотом, кипящим при давлении 12,53 кПа	–	–	4,52 кг 0,81 кВт·ч	4,52 кг 0,81 кВт·ч	4,52 кг 0,81 кВт·ч
Парами азота при давлении 12,53 кПа	–	–	4,51 кг 0,81 кВт·ч	4,12 кг 0,74 кВт·ч	3,22 кг 0,58 кВт·ч
Гелием, кипящим при давлении 101,325 кПа	49,3 кг	49,3 кг	49,3 кг	49,3 кг	49,3 кг
Парами гелия при давлении 101,325 кПа	7,3 кг	4,75 кг	2,99 кг	2,39 кг	1,28 кг
Холодильной машиной с общим КПД 20 %	15,3 кВт·ч	9,02 кВт·ч	5,12 кВт·ч	3,82 кВт·ч	1,39 кВт·ч

способов термостатирования на температурных уровнях 25, 40, 64, 80, 150 К (табл. 2) в рублях на 1 МДж отведенной теплоты использовались следующие значения: плотность жидкого азота 804 кг/м³, плотность жидкого гелия 125 кг/м³, цена жидкого азота 25 руб./л, цена жидкого гелия 250 руб./л, цена электроэнергии 1,5 руб./кВт·ч).

Анализ полученных в табл. 2 результатов позволяет сделать следующие выводы:

– при использовании холодильных машин для охлаждения и термостатирования в диапазоне температур от 25 до 77 К эксплуатационные расходы существенно ниже, чем при использовании жидкого гелия;

– стоимость жидкого гелия, как минимум, на порядок больше стоимости жидкого азота;

– использование конструкций, в которых теплота, отводимая от охлаждаемого объекта, расходуется на испарение жидкого азота или гелия и на нагревание полученного при испарении газа до температуры охлаждаемого объекта позволяет значительно снизить расход низкокипящих жидкостей;

– вакуумирование кипящего азота дает возможность не только расширить температурный диапазон его применения, но и снизить стоимость охлаждения.

С учетом этого, нам удалось сформулировать требования к устройству для отвода теплоты при проведении физического эксперимента в температурной области от 25 до 77 К:

– устройство должно быть выполнено на базе недорогой, надежной холодильной машины, при этом допускается низкий общий КПД холодильной машины;

– в качестве рабочего тела холодильной машины следует использовать гелий;

– в температурном диапазоне от 65 до 77 К необходимо использовать азот, кипящий под вакуумом для охлаждения;

– в температурном диапазоне от 25 до 65 К следует использовать азот, кипящий под вакуумом в качестве теплового резервуара для холодильной машины.

Перечисленным требованиям в части, касающейся холодильной машины, соответствуют конструкции, в которых для получения низких температур используется эффект Ранка – вихревые трубы. По мнению В. С. Мартыновского, «проведенное энергетическое сопоставление

вихревой трубы с обычной воздушной холодильной установкой, имеющей детандер, показало, что вихревая труба имеет значительно меньший КПД. Однако далеко не всегда энергетическое сопоставление может быть решающим при оценке холодильных и теплонасосных систем... Так, при эпизодической потребности в холоде на различных производствах и особенно в лабораториях в случае малой производительности очень удобно применять простую вихревую трубу вместо дорогостоящей и сложной холодильной установки...» [3].

На основании методов проектирования вихревых аппаратов [4...6] нами была проведена предпроектная проработка холодильной машины, использующей в качестве хладагента гелий с давлением 0,6 МПа, давление на выходе составляет 0,1 МПа. Наибольшую эффективность показала четырехступенчатая схема. Приведем примерные характеристики ступеней холодильной машины при расходе хладагента 0,001 кг/с:

– первая ступень опирается на тепловой резервуар температурного уровня 65 К, обеспечивает хладопроизводительность 15 Вт на температурном уровне 49 К, при этом в тепловой резервуар отводится 20 Вт, температура холостого хода (нулевой хладопроизводительности) 40 К, в тепловой резервуар отводится 5 Вт;

– Вторая ступень опирается на тепловой резервуар температурного уровня 50 К, обеспечивает хладопроизводительность 12,5 Вт на температурном уровне 39 К, при этом в тепловой резервуар отводится 17,5 Вт, температура холостого хода 31 К, в тепловой резервуар отводится 5 Вт;

– третья ступень опирается на тепловой резервуар температурного уровня 40 К, обеспечивает хладопроизводительность 6,25 Вт на температурном уровне 29 К, при этом в тепловой резервуар отводится 11,25 Вт, температура холостого хода 25 К, в тепловой резервуар отводится 5 Вт;

– четвертая ступень опирается на тепловой резервуар температурного уровня 30 К, обеспечивает хладопроизводительность 7,5 Вт на температурном уровне 24 К, при этом в тепловой резервуар отводится 12,5 Вт, температура холостого хода 19 К, в тепловой резервуар отводится 5 Вт.

При использовании адиабатного компрессора с общим КПД 60 % для сжатия гелия, имеющего температуру 300 К, давление от 0,1 до 0,6 МПа, с секундным расходом

Таблица 2

Стоимость отвода 1 МДж теплоты, с заданного температурного уровня при различных способах охлаждения

Способ охлаждения	25 К	40 К	64 К	80 К	150 К
Азотом, кипящим при давлении 101,325 кПа	–	–	–	157 руб.	157 руб.
Парами азота при давлении 101,325 кПа	–	–	–	154 руб.	114 руб.
Азотом, кипящим при давлении 12,53 кПа	–	–	142 руб.	142 руб.	142 руб.
Парами азота при давлении 12,53 кПа	–	–	142 руб.	129 руб.	101 руб.
Гелием, кипящим при давлении 101,325 кПа	98600 руб.				
Парами гелия при давлении 101,325 кПа	14600 руб.	9500 руб.	5980 руб.	4780 руб.	2560 руб.
Холодильной машиной с общим КПД 20 %	23 руб.	14 руб.	8 руб.	6 руб.	2 руб.

гелия 0,001 кг потребуется электрическая мощность 2,8 кВт. Рассматриваемая холодильная машина использует в качестве теплового резервуара жидкий азот, кипящий под вакуумом при температуре 64 К, теплота испарения азота 218 КДж/кг.

Приведенные выше данные позволяют выполнить анализ затрат на отвод 1 МДж теплоты с различных температурных уровней в диапазоне от 25 до 65 К при использовании предлагаемой к разработке в данной работе холодильной машины (табл. 3).

Сравнение суммарных затрат на отвод теплоты с помощью предлагаемой к авторами холодильной машины с затратами при традиционном способе термостабилизации в диапазоне температур 25...65 К показывает, что использование устройства, в состав которого входит такая холодильная машина, при проведении физического эксперимента может оказаться экономически выгодным.

Рассматриваемое устройство для отвода теплоты имеет ряд дополнительных преимуществ по сравнению с традиционными устройствами, использующими жидкий гелий. В применяемых устройствах гелий расходуется не только на охлаждение объекта эксперимента, но и на охлаждение всего держателя, масса которого во много раз превышает массу объекта эксперимента, что ведет к повышенному расходу гелия. При использовании холодильной машины отвод теплоты может осуществляться непосредственно из зоны эксперимента, т. е. охлаждать придется гораздо меньшие массы, что удешевит охлаждение и упростит конструкцию держателя. В структуре цены

жидкого гелия порядка половины приходится на стоимость самого газа, поэтому большинство лабораторий, в которых используется жидкий гелий, оснащены системами сбора газообразного гелия с давлением, близким к давлению окружающей среды. Наличие таких систем позволяет отказаться от использования гелиевого компрессора и осуществлять питание холодильной машины от газобаллонной системы, что упростит и удешевит само устройство для отвода теплоты.

Библиографический список

1. Техника низких температур / под ред. Е. И. Микулина, И. В. Марфениной, А. М. Архарова. 2-е изд, перераб. и доп. М.: Энергия, 1975. 512 с.: ил.
2. Архаров, А. М. Теория и расчет криогенных систем: учебник для вузов по спец. «Криогенная техника» / А. М. Архаров, И. В. Марфенина, Е. И. Микулин. М.: Машиностроение, 1978. 415 с.: ил. + 1 вкл.
3. Мартыновский, В. С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов / В. С. Мартыновский; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергия, 1979. С. 179–189.
4. Меркулов, А. П. Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. М.: Машиностроение, 1976. 152 с.
5. Вихревые аппараты / А. В. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.: ил.
6. Гуцол, А. Ф. Эффект Ранка / А. Ф. Гуцол // УФН. Т. 167. 1997. № 6. С. 665.

Таблица 3

Затраты на отвод 1 МДж теплоты с заданного температурного уровня

Температурный уровень	25 К	30 К	40 К	50 К
Суммарный расход хладагента, через компрессор, кг	840,4	471,4	173	66,7 кг
Затраты электроэнергии на привод гелиевого компрессора, кВт·ч	654	367	135	52
Затраты жидкого азота, кг	25,69	15,41	8,56	6,12
Затраты электроэнергии на вакуумирование жидкого азота, кВт·ч	4,6	2,8	1,54	1,1
Затраты на жидкий азот, руб.	798,82	479,17	266,17	190,3
Затраты на электроэнергию, руб	987,9	554,7	204,81	74,5
Суммарные затраты, руб	1787	1034	471	285
Суммарные затраты при охлаждении парами гелия при давлении 101,325 кПа, руб	14600	12514	9500	7850

B. N. Efremov, S. P. Mjasnikov, G. M. Abramova

DEVICE FOR TAP OF THE HEAT WHEN UNDERTAKING THE PHYSICAL EXPERIMENT WITHIN THE RANGE OF TEMPERATURE FROM 25 BEFORE 77 K

In article are brought some results of the work, executed at development of the technical requirement on creation device for tap of the heat when undertaking the experimental study in magnetic field heat and electric characteristic new material within the range of temperature from 25 before 77 K.

В. В. Злотенко, Н. Н. Ишенина

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрена структура сотовых панелей, обоснован выбор кольцевого сверла как режущего инструмента для получения отверстий склеенных сотопанелей.

В конструкции космических аппаратов (КА) связи применяются сотовые панели различного назначения, выполненные из разных материалов. Применение легких и жестких трехслойных панелей, изготовленных с использованием тонких обшивок ($t = 0,3 \dots 0,5$ мм) и сотового заполнителя из алюминиевых сплавов в качестве базы для размещения радиолокационного оборудования эффективно решает проблему прецизионного позиционирования и обеспечения теплового режима работы приборов при эксплуатации в космическом пространстве.

Федеральной космической программой России на период 2004–2015 гг. предусмотрено производство ряда современных КА, созданных на базе унифицированных платформ негерметичного исполнения с использованием клееных сотовых панелей из алюминиевых сплавов: «Экспресс-1000», «Экспресс-2000», «Экспресс-АТ», «Экспресс-АМ» (рис. 1) и др.

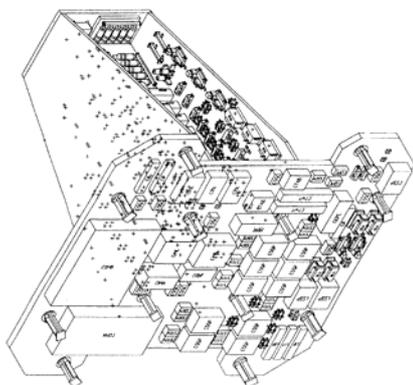


Рис. 1. Модуль полезной нагрузки КА «Экспресс-АМ» с установленными приборами, созданный на базе клееных алюминиевых сотопанелей

На одной сотопанели могут быть установлены сотни приборов, что требует наличия сотен и тысяч опорных узлов для их крепления. Опорный узел представляет собой закладной элемент в виде катушки с крепежным резьбовым отверстием, вклеиваемый в предварительно выполненное в сотопанели посадочное отверстие (рис. 2). В клееной сотопанели отверстия под установку закладных элементов выполняются методом механической обработки.

Оптимизация процесса резания при выполнении посадочных отверстий, обеспечив надежность и качество сотопанели, позволит значительно повысить производительность и снизить себестоимость, что имеет большое значение в условиях высокой конкуренции на внутреннем и внешнем рынке КА связи, навигации и геодезии.

Механическая обработка сотопанели имеет свои особенности, накладывающие ряд ограничений на параметры режимов резания. Они обусловлены тем, что сотопанель представляет собой композиционный материал с неоднородными свойствами входящих в нее структурных элементов.

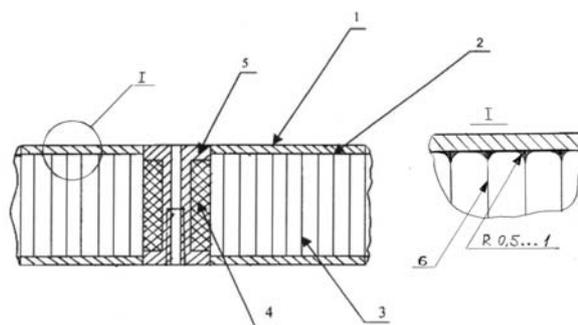


Рис. 2. Структура сотовых панелей: 1 – обшивка из сплава Д16АТ с покрытием Ан.Окс.хром./гр. ЭП-0234; 2 – пленка клеевая ВК-36РТ.260 (ТУ 1-595-24-486–96); 3 – сотовый заполнитель 5056-2,5-23П (ТУ У-1431577.232–97); 4 – пенокомпунд ПЭК-74 (ТУ 2257-315-07500935–2000); 5 – закладной элемент; 6 – клей ВК-25

Известно, что любой процесс резания сопровождается тепловыделением, которое при обработке клееных конструкций может стать ограничивающим фактором процесса. Наиболее критичным в этой части является клеевое соединение «обшивка–сотовый заполнитель», так как нагрев клея ВК-36РТ выше квалификационной температуры $+150$ °С приводит к его охрупчиванию, снижению адгезии и, как следствие, – к разрушению клеевого соединения и всей сотовой конструкции. Поэтому возникла необходимость в проведении исследования тепловых процессов резания при механической обработке сотовой панели для определения оптимальных режимов резания, обеспечивающих сохранение механических свойств сотовой конструкции.

Объектом исследования является технологическая, математическая и теплофизическая модель обработки резанием сотопанели при выполнении отверстий кольцевым сверлом. Цель работы состояла в обеспечении надежности и качества изделий на базе трехслойных сотовых конструкций за счет сохранения механических свойств сотовой панели при наименьшей себестоимости ее изготовления в рамках исследования процессов резания.

В нашей стране исследования конструкции и технологии изготовления сотовых клееных конструкций из алюминиевых сплавов при производстве авиационной

техники проводились в ряде научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий, в том числе в НИАТ, ВИАМ. По результатам проведенных исследований в целях обеспечения подготовки производства ряда изделий, имеющих агрегаты с сотовым наполнителем, был разработан руководящий технический материал (РТМ-984). Последующие исследования были посвящены обеспечению и регулированию механических, теплофизических и других характеристик, которые необходимы для эффективной реализации инженерных разработок по созданию сотовой панели как композиционного материала.

В рамках проведения работ по технологической подготовке производства клееных сотовых панелей из алюминиевых сплавов в ФГУП НПО ПМ был проведен ряд исследований по технологии изготовления данных панелей с выпуском итоговых отчетов, содержащих рекомендации, в том числе и по обработке резанием клееных панелей. Вместе с тем процесс резания клеенных сотовых конструкций из алюминиевых сплавов по-прежнему остается малоизученным и требует проведения дополнительных исследований.

Сотовые (сандвичевые) конструкции – особая форма композиционных материалов. Сотовые конструкции состоят из следующих элементов: двух тонких прочных облицовочных пластин – обшивок, толстой легкой сердцевины – наполнителя, разделяющего несущие пластины и распределяющего нагрузку между ними, и адгезионных слоев, связывающих обшивки с наполнителем и передающих нагрузку от наполнителя к обшивкам и обратно.

В аэрокосмической промышленности, в частности для космических аппаратов связи, наиболее широко применяются клееные сотовые панели из алюминиевых сплавов.

В исследуемой конструкции сотовых панелей используются обшивки из сплава Д16АТ с покрытием Ан.Окс. хром./гр.ЭП-0234, пленка клеевая ВК-36РТ.260 (ТУ 1-595-24-486-96), пенокомпануд ПЭК-74 (ТУ 2257-315-07500935-2000) и сотовые наполнители 5056-2,5-23П (ТУ У-1431577.232-97), АМг2-Н-2,5-40 (ТУ 92-923-1-205-88).

Сотовый наполнитель представляет собой сотовую ячеистую структуру, состоящую из тонких полос алюминиевой фольги, соединенных в определенных местах клеем ВК-25.

Пленка клеевая ВК-36РТ является полимерным пленочным материалом на эпоксидной основе и предназначена для склеивания сотовых наполнителей с обшивками. Клей квалифицирован для интервала рабочих температур от -180 до $+150$ °С. Температура отвержения 175 ± 5 °С в течение 3 ч, давление $0,8...1,0$ кгс/см².

В процессе полимеризации клеевая пленка ВК-36РТ переходит в жидкую фазу, клей перераспределяется и концентрируется в местах соединения сотового наполнителя и обшивок по периметру каждой ячейки в форме галтели (см. рис. 2). В данном состоянии клей отвердевает, образуя на внутренних поверхностях обшивок вафельную структуру.

Таким образом, в процессе резания клееной сотовой панели инструмент последовательно прорезает слои материалов, различающихся между собой как прочностны-

ми, теплофизическими и другими свойствами, так и формой (рис. 3).

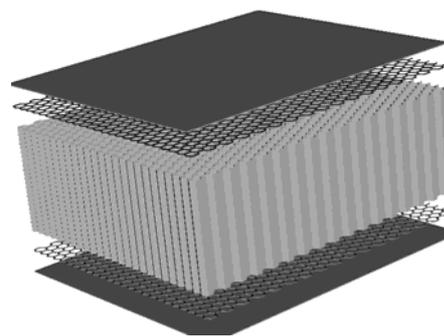


Рис. 3. Ячейка сотовой панели

Для вырезки отверстий в клеенной сотопанели в качестве режущего инструмента было выбрано кольцевое сверло, в соответствии с рекомендациями РТМ-984 и в связи с тем, что применение кольцевых сверл, по сравнению со сплошным сверлением, обеспечивает значительное повышение производительности труда.

Кольцевые сверла в металлообработке используются в основном при сверлении глубоких отверстий сравнительно больших диаметров (рис. 4). Кольцевое сверло представляет собой полый цилиндр, на торце которого закреплены режущие зубья. На наружной поверхности кольцевого сверла могут быть прорезаны стружечные канавки, расширяющиеся к нерабочему торцу для облегчения удаления стружки.

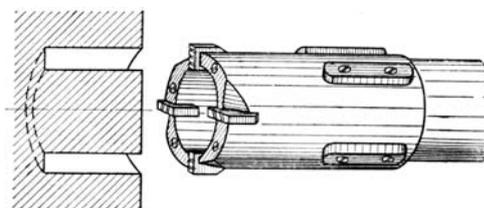


Рис. 4. Кольцевое сверло

При проектировании кольцевых сверл можно применять различные схемы резания, обеспечивающие деление ширины резания, деление подачи и комбинированную схему. По схеме, обеспечивающей деление ширины резания, подача, приходящаяся на каждый зуб, равна подаче в целом на инструмент. Каждый зуб срезает стружку небольшой ширины, в совокупности же все зубья инструмента снимают полную ширину резания. Схема деления подачи обеспечивает срезание полной ширины резания каждым зубом инструмента. Благодаря этому значительно увеличивается подача на оборот инструмента в целом: она равна произведению подачи на зуб на число зубьев. Однако условия работы инструмента, сконструированного по схеме деления подачи, затруднительны, так как при полной ширине резания стружка своими торцами соприкасается с боковыми поверхностями отверстия, что усложняет ее отвод. Поэтому чаще всего используется комбинированная схема резания, когда происходит деление ширины реза и подачи между отдельными зубьями.

На работу инструмента влияют стружколомы, или выкружки, на передней поверхности зубьев, которые обеспечивают получение дробленой стружки с эффективным отводом ее из зоны резания. Отвод стружки при кольцевом сверлении происходит во взвешенном состоянии в потоке охлаждающей жидкости, подаваемой под давлением в зону резания.

Надежным методом дробления стружки является кинематический метод, когда обработка ведется с принудительными вибрациями и обеспечивается прерывистое резание, что оказывается особенно эффективным при кольцевом сверлении легированных сталей и других материалов.

Величины задних углов на режущих кромках выбираются небольшими (порядка $3...5^\circ$), так как большие задние углы дают неплавное резание в начале работы инструмента. По мере затупления инструмента вибрации постепенно прекращаются.

Для обоснованного выбора геометрии и материала режущей части кольцевого сверла были проведены исследования, целью которых была отработка конструкции режущего инструмента, обеспечивающая стабильность геометрических размеров полученных сквозных отверстий в сотовых панелях.

Исходные данные:

- диаметр обрабатываемого отверстия – $20...40$ мм;
- требуемый квалитет точности отверстия – Н10;
- толщина сотовой панели – $30...50$ мм.

В результате проведения экспериментальной отработки инструмента было спроектировано и изготовлено кольцевое сверло (рис. 5) со следующими параметрами:

- количество зубьев – 4;
- угол наклона режущей части $\alpha - (-10^\circ)$;
- высота зуба $h - 10$ мм;
- ширина режущей части $a - 2,0$ мм;
- материал режущей части – Р6М5К5;
- форма и размеры хвостовика – конус Морзе №2 (крепление в шпинделе через переходную втулку).

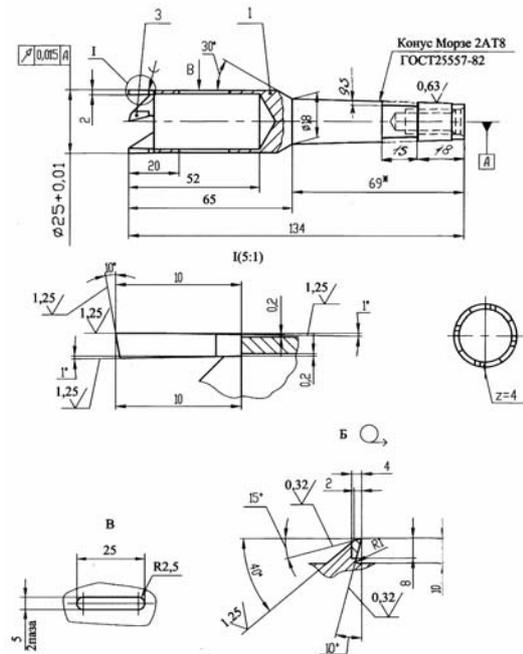


Рис. 5. Эскиз кольцевого сверла

V. V. Zlotenko, N. N. Ishenina

PECULIARTIES OF MACHINING OF ALUMINIUM CELLULAR CONSTRUCTIONS

Is considered the structure of cellular panels, is substantiated the choice of the annular auger of cutting instrument for the reception of openings of stick cellular panels.

С. Н. Козловский, Е. Г. Яшметов

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ ПРОТИВ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫПЛЕСКОВ

Рассмотрены причины образования выплесков и приведены технологические приемы их предотвращения.

Выплески – это выброс части расплавленного металла из зоны сварки. Они снижают эксплуатационные свойства сварных изделий и в ряде случаев, например в авиационном и космическом машиностроении, недопустимы. Однако большинство традиционных технологий контактной точечной сварки (КТС) не могут обеспечить их отсутствие.

Выплески, с учетом проведенных исследований и современных представлений о причинах и механизмах их образования, можно разделить на несколько видов (рис. 1).

Во внутренних выплесках (рис. 1, *в, г и д*) расплавленный металл выбрасывается в зазор между свариваемыми деталями из контакта «деталь – деталь», в наружных выплесках (рис. 1, *а и б*) расплавленный металл выбрасывается вне деталей из контакта «электрод – деталь» или ядра расплавленного металла. А внутренние и наружные выплески в свою очередь разделяют на начальные (рис. 1, *а и в*), которые образуются в начале процесса нагрева, до расплавления металла в контакте «деталь – деталь», и конечные (рис. 1, *б, г и д*), которые образуются после начала плавления металла в свариваемом контакте.

Механизм образования начальных выплесков, как наружных (рис. 1, *а*), так и внутренних (рис. 1, *в*), исследован наиболее полно. Общепринятым можно считать то, что основной причиной, вызывающей их образование, является местный (локальный) перегрев металла в контактах «электрод – деталь» (при наружных выплесках) или «деталь – деталь» (при внутренних выплесках).

Ранее вполне обоснованно считалось, что одной из наиболее существенных причин образования начальных

выплесков является недостаточная скорость микропластических деформаций шероховатостей в контактах «электрод – деталь» или «деталь – деталь» из-за уменьшения усилия сжатия деталей вследствие большой инерционности подвижных частей привода сварочной машины [1]. Однако после того как на машинах для точечной сварки между приводом усилия и ползуном стали устанавливаться пружины, а между ползуном и направляющими заклинивающие силы трения и исключают заклинивание ползуна, эта причина стала иметь очень малое значение. В современных сварочных машинах усилие сжатия электродов в начале процесса сварки изменяется несущественно (рис. 2), а во время импульса тока даже несколько увеличивается (примерно на 2...5%).

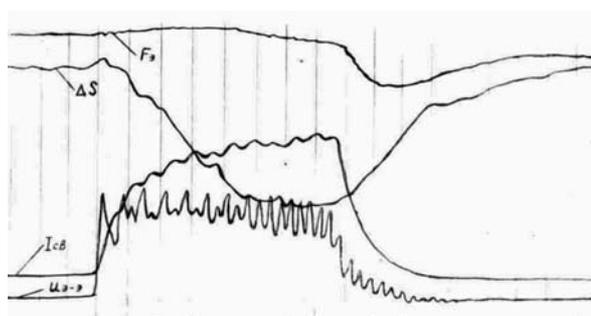


Рис. 2. Изменение сварочного тока $I_{св}$, напряжения на участке «электрод – электрод» $U_{с,з}$, усилия сжатия электродов $F_{з}$ и осевого перемещения верхнего электрода ΔS в процессе точечной сварки без выплесков для сплава АМг6, 1,5 + 1,5 мм, $F_3 = 6,2$ кН, $t_{св} = 0,08$ с

Выплески при контактной точечной сварке			
	<i>Начальные</i>	<i>Конечные</i>	
<i>Наружные</i>			
<i>Внутренние</i>		<i>Активные</i> 	<i>Пассивные</i>

Рис. 1. Схемы выплесков при контактной точечной сварке

В современных технологиях КТС начальные выплески образуются в основном из-за плохой подготовки поверхностей деталей или загрязнения рабочих поверхностей электродов, перекосов электродов или деталей, чрезмерно быстрого нарастания сварочного тока либо одновременного воздействия нескольких из перечисленных выше факторов. Таким образом, очевидно, что образование начальных выплесков связано не столько с техническими проблемами осуществления технологии КТС, а сколько с уровнем культуры производства и состоянием технологической дисциплины. Устранение перечисленных выше причин, как правило, предотвращает образование выплесков этого вида.

Проведенные исследования показали, что если диаметр начального контакта (или диаметр уплотняющего пояска d_{nr} в любой момент до начала плавления металла) не меньше $(2...3)s$, где s – толщина деталей, а его электрические параметры находятся в пределах нормы, то начальные выплески не образуются. Тогда, приняв минимальный диаметр $d_{nr\min}$ свариваемого контакта, при котором начальные выплески отсутствуют, зависимым от толщины деталей S : $d_{nr\min} \geq (2...3)S$, условие отсутствия начального выплеска на основании известного уравнения термодформационного равновесия процесса КТС [2] можно записать следующим образом:

$$\frac{\pi d_{nr\min}^2}{4} \sigma_{ср} \leq F_{сж} \text{ или } \frac{\pi[(2...3)s]^2}{4} \sigma_{ср} \leq F_{сж}, \quad (1)$$

где $\sigma_{ср}$ – среднее значение напряжений в площади уплотняющего пояска; $F_{сж}$ – усилие сжатия в площади свариваемого контакта.

В практике точечной сварки наиболее часто встречающимися и до сих пор наиболее трудно устранимыми являются конечные выплески.

Конечные наружные выплески (см. рис. 1, б) образуются в результате прорыва твердого металла над ядром при чрезмерно большом проплавлении деталей и диаметре ядра. В большей мере они характерны для односторонней контактной точечной сварки. При двусторонней точечной сварке конечные наружные выплески возникают, как правило, только при сварке деталей из титановых сплавов или, что происходит значительно реже, из высоколегированных сталей. Они легко устранимы за счет уменьшения проплавления деталей, например за счет уменьшения жесткости режима сварки.

Наибольшей проблемой при разработке технологии КТС и в практической сварке до сих пор является наличие конечных внутренних выплесков, особенно при сварке изделий ответственного назначения.

В практике точечной сварки очень часто встречается такой конечный внутренний выплеск, который образуется в процессе формирования ядра в период от начала плавления металла до окончания импульса тока. Как правило, при режимах сварки, близких к оптимальным режимам, момент его образования находится в пределах 2/3 длительности импульса тока.

Во многих работах образование такого выплеска объясняется чрезмерно высокими скоростями плавления металла, в результате чего уменьшается ширина уплотняющего пояска и происходит его прорыв расплавленным металлом [3]. Однако некоторыми исследователями уже

давно отмечалось, что внутренние конечные выплески образуются и при большой ширине уплотняющего пояска [1; 4] и что они отсутствуют при ее уменьшенных значениях [5; 6]. Очевидно, что объяснение образования конечного выплеска только отклонением тепловых процессов не полностью отражает реальное взаимовлияние факторов, приводящих к выбросу расплавленного металла.

При экспериментальных исследованиях процессов формирования соединений при КТС получила подтверждение та точка зрения, что возникновение выплеска определяется не сопротивлением уплотняющего пояска против прорыва, т. е. (его прочностью, как это считалось многими исследователями ранее). При этом не удалось установить какой-либо однозначной зависимости между шириной уплотняющего пояска и склонностью процесса к выплескам. Так, при определенных условиях (рис. 3) выплески могут возникать и при большой ширине уплотняющего пояска $b_{п}$ (рис. 3, а) (при $b_{п} \approx 2,25 S$, где S – толщина деталей), или отсутствовать при относительно небольшой его ширине (рис. 3, б) (при $b_{п} \approx (0,2 \div 0,3) S$).

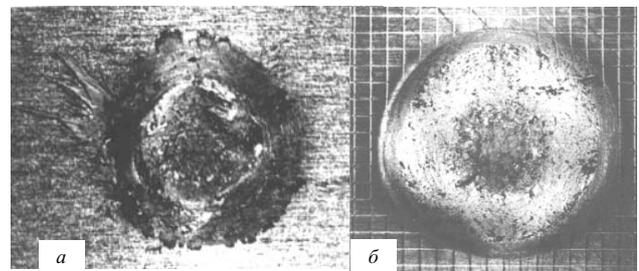


Рис. 3. Вид сварных соединений: а – для сплава АМг6, 2 + 2 мм, $I_{св} = 37$ кА, $F_3 = 7,0$ кН, $t_{св} = 0,3$ с; $d_я = 7,2$ мм; б – для сплава МА2-1, 2 + 2 мм, $I_{св} = 35$ кА, $F_3 = 5,5$ кН, $t_{св} = 0,2$ с (шаг координатной сетки 0,5 мм)

При математическом моделировании процесса КТС получили подтверждение данные о том, что образование внутреннего конечного выплеска связано не с шириной уплотняющего пояска, а с раскрытием зазора в уплотняющем пояске, вызванным увеличением давления расплавленного металла в ядре из-за увеличения его объема при нагреве и расплавлении (рис. 4).

То, что образование таких выплесков в основном происходит путем раскрытия зазора давлением расплавленного металла в ядре, подтверждается и экспериментально, например характером его выброса одновременно по всему контуру уплотняющего пояска (рис. 4, а). Конечно, такой выброс металла можно получить только на машинах с жестким силовым контуром. В большинстве же случаев сварки трудно обеспечить равномерное распределение напряжений по контуру уплотняющего пояска из-за деформаций элементов силовых контуров машин, приводящих к перекосу электродов. В результате чаще всего раскрытие зазора происходит в месте с наименьшими сжимающими напряжениями, что сопровождается локальным выбросом расплавленного металла (рис. 4, б).

Отклонения усилия сжатия электродов $F_{сж}$ во время импульса тока относительно его установившихся значений до начала импульса тока, которые происходят из-за инерционности подвижных частей приводов сварочных

машин и сил трения в них, не могут существенно влиять на устойчивость процесса КТС против образования конечных выплесков. Так, при КТС на режимах, близких к оптимальным, в первой половине процесса нагрева $F_{э}$ увеличивается всего на 2...7%, а во второй – уменьшается на 1...5% по сравнению с его величиной до начала $I_{св}$ (см. рис. 2). Таким образом, даже предельные динамические отклонения $F_{э}$ на +7...-5% не могут являться основной причиной образования выплесков, поскольку $F_{э}$ в технологии КТС задают на 15...25% больше некоторой его величины, называемой критической, при которой выплески образуются регулярно [7].

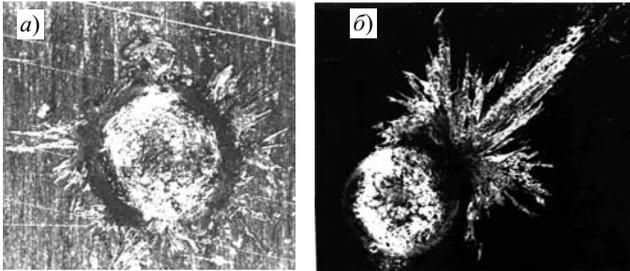


Рис. 4. Вид сварных соединений деталей из сплава АМГ-6 с внутренним конечным выплеском:
 а – 1 + 1 мм, $I_{св} = 29$ кА, $F_{э} = 4,25$ кН, $t_{св} = 0,06$ с;
 б – 2 + 2 мм, $I_{св} = 45$ кА, $F_{э} = 8,0$ кН, $t_{св} = 0,08$ с

Сразу же после выплеска подвижный электрод резко приближается к неподвижному (рис. 5). Из-за этого в силовом контуре машины возникают колебания, в том числе и величины $F_{э}$, по амплитуде достигающие до -20...-30%. При этом происходит уменьшение падения напряжения на участке «электрод – электрод» $U_{ээ}$ из-за увеличения площадей контактов. Сварочный ток $I_{св}$ после выплеска заметно не изменяется.

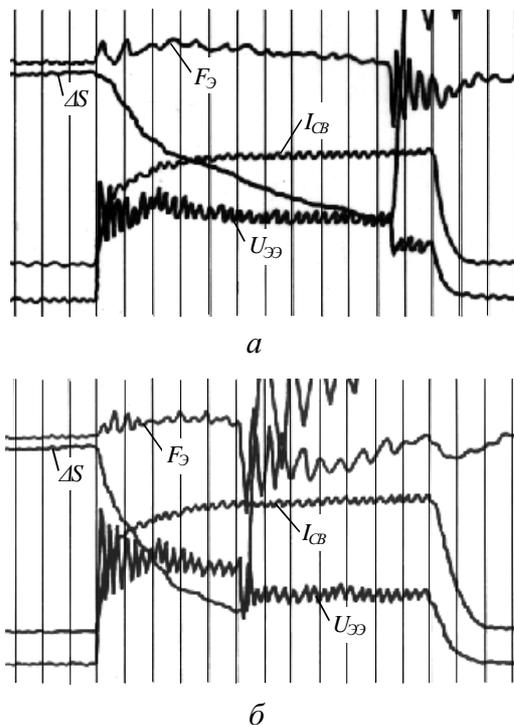


Рис. 5. Моменты образования выплесков при сварке деталей из сплава АМГ6, 2 + 2 мм, $F_{э} = 7,0$ кН, $t_{св} = 0,08$ с: а – $I_{св} = 37$ кА; б – $I_{св} = 45$ кА

При сварке на режимах, близких к оптимальным, образование внутренних конечных выплесков носит случайный характер, поскольку, как правило, является следствием неблагоприятного сочетания нескольких возмущающих факторов процесса КТС. Вместе с тем зависимость процесса сварки, склонно к образованию выплесков, а также момента их образования, от изменений сварочного тока $I_{св}$ и усилия сжатия электродов $F_{э}$ имеет вполне определенные закономерности. Так, увеличение сварочного тока $I_{св}$ однозначно смещает момент образования выплеска к началу процесса КТС (рис. 5, а и б). Аналогично на момент образования выплеска влияет и уменьшение усилия сжатия электродов $F_{э}$. При некоторых сочетаниях $I_{св}$ и $F_{э}$ выплески могут образовываться практически сразу же после начала плавления металла.

Такое влияние отклонений $I_{св}$ и $F_{э}$ на устойчивость процесса против образования выплесков является типичным для процессов КТС деталей любых толщин из всех конструкционных сталей и сплавов. Это теоретически подтверждается и тем, что давление расплавленного металла в ядре $P_{я}$ в любой момент времени t процесса КТС пропорционально текущим значениям сопротивления пластической деформации $\sigma_{дл}$ металла в области пояска и его диаметру $d_{я}$ и обратно пропорционально диаметру ядра $d_{я}$ [8]:

$$P_{я} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{дл} \left(\frac{d_{я} \exp(1/6)}{d_{я}} + \frac{2}{3} \right). \quad (2)$$

Увеличение $I_{св}$ и уменьшение $F_{э}$ однозначно приводят к повышению жесткости режимов сварки. А это в свою очередь приводит к увеличению сопротивления пластической деформации металла в области уплотняющего пояска $\sigma_{дл}$ и давления $P_{я}$ в ядре.

Практика точечной сварки показывает, что конечные выплески за счет прорыва пояска не образуются, если при увеличении диаметра ядра $d_{я}$ до конечного его значения $d_{я}$, которое не превышает допустимых значений, ширина уплотняющего пояска $b_{я} = (d_{я} - d_{я})/2$ в любой момент роста ядра не меньше $(0,2...0,5) S$. Тогда при минимальной ширине уплотняющего пояска $b_{я \min}$, при которой внутренние конечные выплески не образуются и которая зависит от толщины деталей S ($b_{я \min} \geq (0,2...0,5) S$), условие отсутствия внутренних конечных выплесков на основании известного уравнения равновесия процесса КТС можно выразить следующим образом:

$$\frac{\pi d_{я}^2}{4} P_{я} + \frac{\pi (d_{я} + d_{я})}{2} (0,2...0,5) S \sigma_{ср} \leq F_{сж}, \quad (3)$$

где $t F_{сж}$ – минимальное усилие сжатия для момента в контуре уплотняющего пояска, необходимое для предотвращения конечных выплесков; $\sigma_{ср}$ – среднее значение нормальных напряжений в площади уплотняющего пояска.

Это также подтверждается тем, что применение циклов сварки с программированным изменением усилия $F_{э}$, в которых на начальной стадии процесса его величину задают равной 20...40% от конечной и затем плавно увеличивают во время импульса тока, приводит даже к увеличению критического диаметра ядра на 8...10% по сравнению со сваркой при $F_{э} = \text{const}$.

Повышение устойчивости процесса КТС против образования выплесков в этом случае обусловлено тем, что

при выполнении условий отсутствия начального (1) и конечного (3) выплесков в любой момент процесса сварки обеспечивается формирование уплотняющего пояска шириной не меньше $(0,2 \dots 0,5) S$, прочность стенки которого при нормальном размере ядра уже достаточна, чтобы исключить выплеск ее прорывом. При этом уплотняющий поясок получается меньшей ширины, но большей высоты, имеет более высокую температуру и меньшее сопротивление деформации. Поэтому при таком уплотняющем пояске воздействия динамических возмущающих факторов (например, из-за пульсаций $F_{э}$ или $I_{св}$) лучше обрабатываются вследствие большей деформационной подвижности в нем металла. Значительное же завышение усилия сжатия электродов $F_{э}$, как это часто бывает при сварке с его неизменной величиной, наоборот, может увеличить вероятность образования выплеска вследствие уменьшения деформационной подвижности металла в пояске из-за влияния геометрического (увеличения диаметра и ширины пояска с одновременным уменьшением его высоты) и теплового (снижения температуры и, следовательно, повышения сопротивления деформации металла) факторов. Это в конечном итоге, согласно зависимости (2), приводит к увеличению давления расплавленного металла в ядре и вероятности образования конечного выплеска.

Следовательно, можно считать достаточно обоснованным то, что конечные выплески происходят вследствие раскрытия пояска давлением расплавленного металла в ядре при отклонениях параметров термомеханических процессов от их оптимальных значений.

Вместе с тем известно, что внутренний конечный выплеск может образовываться в самом конце импульса тока или даже после его окончания во время приложения ковочного усилия (рис. 6). Как правило, в эти моменты процесса КТС выплески образуются при сварке на очень мягких режимах в основном электродами с плоской рабочей поверхностью.

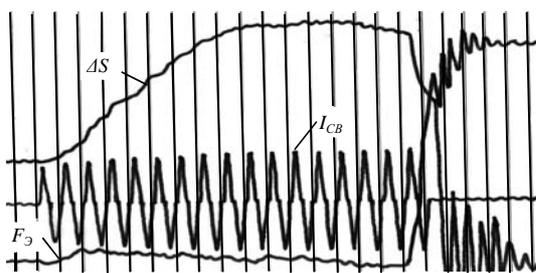


Рис. 6. Образование выплеска в момент приложения ковочного усилия при сварке деталей из стали 12X18H10T, $1,5 + 1,5$ мм, $I_{св} = 6,8$ кА, $F_{э} = 6,2$ кН, $t_{св} = 0,34$ с

Этот вид выплеска также происходит вследствие раскрытия уплотняющего пояска давлением расплавленного металла в ядре. Однако причина и механизм раскрытия уплотняющего пояска здесь иные, чем в предыдущих случаях.

Основной причиной образования такого вида выплесков являются чрезмерно большие размеры ядра (его высоты $h_{я}$ и диаметра $d_{я}$). Вследствие этого при сжатии деталей электродами, например ковочным усилием

(см. рис. 6), твердый металл под ними в контуре L_3 чрезмерно вдавливается (проседает) в объем ядра и работает как мембрана (см. рис. 1, д), увеличивая в нем давление $P_{я}$ расплавленного металла. Это же давление $P_{я}$ вне контура рабочей поверхности электрода L_3 стремится раздвинуть детали и раскрыть уплотняющий поясок. При определенных сочетаниях значений высоты и диаметра ядра, усилия сжатия электродов давление в ядре становится достаточным для раскрытия пояска и образования выплеска этого вида.

Предотвращаются данные выплески относительно просто. Для этого достаточно скорректировать параметры режима сварки до значений, обеспечивающих оптимальные размеры ядра. Если же технологические факторы (подготовка деталей, параметры оборудования и т. д.) не гарантируют требуемую стабильность размеров ядра, то в этих случаях рационально применять средства стабилизации и регулирования режима сварки.

Очевидно, что причины, которые приводят к образованию описанных выше видов внутреннего конечного выплеска, различны, и для их предотвращения требуются разные технологические мероприятия. Поэтому первый из них (см. рис. 1, з), при образовании которого увеличение давления расплавленного металла в ядре в основном определяется термомеханическими процессами, протекающими в зоне формирования соединения, целесообразно называть активным конечным выплеском, а второй (см. рис. 1, д), при образовании которого увеличение давления в ядре в основном определяется вдавливанием электродов в объем ядра, – пассивным конечным выплеском.

Основные технологические приемы предотвращения образования активных конечных выплесков при традиционных способах КТС, такие как увеличение усилия сжатия электродов и уменьшение жесткости режимов сварки, практически исчерпали свои технологические возможности. Поэтому эти технологии традиционных способов точечной сварки не гарантируют отсутствие этого дефекта, что особенно неприемлемо при изготовлении узлов изделий ответственного назначения.

Перспективным решением этой проблемы, позволяющим существенно повысить устойчивость процесса КТС против образования конечных выплесков, является применение способов точечной сварки с целенаправленным программированием параметров режимов [9], а кардинальным решением, позволяющим практически гарантировать их отсутствие, – применение способов КТС, дающих возможность искусственно перераспределять напряжения в площадях контактов между центральной частью зоны сварки и ее периферией, т. е. применение способов КТС с обжатием периферийной зоны соединений [10].

Таким образом, уточненный механизм образования выплесков и сформулированные условия их отсутствия при КТС делает более обоснованным выбор технологических мероприятий по их предотвращению при разработке технологических процессов изготовления сварных конструкций.

Библиографический список

1. Мирлин, Г. А. Образование выплесков при точечной сварке и методы их устранения / Г. А. Мирлин,

В. С. Савченко, В. С. Щедров // Сварочное производство. 1964. № 5. С. 4–7.

2. Методика программирования сварочного усилия при точечной сварке на стадии нагрева / С. Н. Козловский, Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, В. И. Малимонов // Известия вузов. Машиностроение. 1988. № 10. С. 123–129.

3. Рукосуев, А. П. К вопросу о выплеске при точечной электрической сварке / А. П. Рукосуев // Качество, надежность и долговечность в машиностроении. Красноярск, 1970. С. 20–28.

4. Тарасов, Н. М. Особенности формирования соединения при точечной сварке стали X18H9T / Н. М. Тарасов, В. К. Карташов // Сварочное производство. 1968. № 11. С. 8–10.

5. Программирование сварочного усилия при точечной электросварке легких сплавов / В. Г. Подлесных, Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Г. П. Царьков // Электросварка / Информэлектро. М., 1971. Вып. 9. С. 10–12.

6. Чулошников, П. Л. Точечная и роликовая электро-сварка легированных сталей и сплавов / П. Л. Чулошников. М.: Машиностроение, 1974. 232 с.

7. Козловский, С. Н. Определение устойчивости процесса контактной точечной сварки / С. Н. Козловский, А. Н. Липин // Сварочное производство. 1995. № 9. С. 29–31.

8. Козловский, С. Н. Моделирование взаимодействия деталей в площади контакта при точечной сварке / С. Н. Козловский // Известия вузов. Сер. «Машиностроение». 1990. № 9. С. 89–94.

9. Программирование усилия сжатия электродов при контактной точечной сварке // Сварочное производство. 1990. № 1. С. 33–35.

10. Козловский, С. Н. Контактная точечная сварка с обжатием периферийной зоны соединения / С. Н. Козловский // Сварочное производство. 1991. № 10. С. 4–7.

S. N. Kozlovsky, E. G. Jashemrtov

SOME ASPECTS OF THE INCREASE OF THE STABILITY OF THE PROCESS OF POINT WELDING AGAINST EDUCATION OF THE SPLANING

Splashes formation reasons are considered and their prevention techniques are given in the article.

Г. Г. Крушенко, С. Н. Решетникова

ВЛИЯНИЕ ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ

Установлено, что расположение отливки в полости литейной формы и конструкция литниково-питающей системы влияют на уровень механических свойств литых деталей.

При получении литым деталям двигателей, несущих высокие эксплуатационные нагрузки, в случае невозможности оценки уровня их механических свойств либо на прилитых, либо на вырезанных из тела отливок образцах, эти испытания проводят на отлитых одновременно с заливаемой деталью испытательных образцах-свидетелях. Однако на одних предприятиях эти образцы заливают горизонтально, на других – вертикально, как предусмотрено соответствующей заводской технической документацией.

Данное исследование проведено в производственном цехе для производства различных транспортных средств конструкционным алюминиевом литейном сплаве АК7ч с целью определения влияния горизонтального и вертикального положения образцов с диаметром рабочей части 12,0 мм в литейной форме на уровень их механических свойств. Образцы обоих типов испытывали без обточки поверхности. Литая поверхность зачищалась только в месте отрезки питателей. После испытаний механических свойств образцов обоих типов из их головок диаметром 18,0 мм вырезали гагаринские образцы с диаметром рабочей части 6,0 мм и также подвергали их испытанию, перед которым их плотность определяли методом гидростатического взвешивания.

Анализ результатов испытаний показал, что временное сопротивление σ_b вертикально отлитых образцов диаметром 12,0 мм в среднем составляет 238 МПа, а горизонтально отлитых – 225 МПа, относительное удлинение δ оказалось больше у горизонтально отлитых образцов – соответственно 3,30 и 6,19 %.

Изучение геометрии литниково-питающих систем (ЛПС) кокилей обоих типов показало их существенное различие. Так, в горизонтальном кокиле располагается один образец массой 0,125 кг, заливка образца и его питание в период кристаллизации осуществляется с помощью конической прибыли массой 0,675 кг с подводом металла в каждую головку вертикальным щелевидным питателем с площадью сечения, равной $7,57 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (суммарная площадь $15,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) и в рабочую часть – питателем с площадью сечения $4,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. В вертикальном кокиле располагается два образца с массой каждого по 0,165 кг. Металл подводится к обеим головкам с помощью щелевидных вертикальных питателей с площадью сечения каждого $2,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (суммарная площадь $5,04 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$) от двух щелевидных вертикальных металлопроводов. Масса ЛПС составляет 0,85 кг. Длина горизонтальных образцов составляет 200 мм, что соответствует требуемому конечному размеру, длина вертикального образца – 300 мм – за счет большей длины верхней головки, которая обеспечивает питание кристаллизующегося образца.

Механические свойства образцов испытывали в термически обработанном состоянии (режим Т5). Твердость

измеряли по Бринеллю при диаметре шарика 10 мм, нагрузке 1 000 кг и длительности 30 с.

Анализ результатов испытаний образцов диаметром 6,0 мм, вырезанных из головок диаметром 18,0 мм испытанных образцов диаметром 12,0 мм, показал, что механические свойства у горизонтального варианта отличаются меньше, чем у вертикального. Так, σ_b образцов из головок горизонтальных образцов отличается всего на 1,7 %, тогда как для вертикальных – на 2,7 % (больше в 1,58 раза σ_b из нижних головок), а δ – на 0,4 и 10,0 % (разница в 25 раз), твердость НВ (диаметр шарика 5,0 мм, нагрузка – 250 кг, длительность действия нагрузки – 30 с) – на 0,7 и на 2,7 % (разница в 3,85 раза). Для вертикально отлитых образцов все характеристики механических свойств образцов, вырезанных из нижних головок, более высокие, чем из верхних.

Плотность образцов из обеих головок горизонтальных образцов оказалась практически одинаковой, тогда как для вертикального варианта она на 0,31 % больше для образцов из нижних головок. Известно [1], что плотность алюминиевых сплавов той же системы, что и сплав АК7ч (Al-Si) отражает наличие в отливках несплошностей газового, усадочного и газовой-усадочного происхождения, и ее величина коррелирует с уровнем механических свойств, что и имеет место в данном случае. Так, изучение продольного осевого сечения испытательных образцов диаметром 12,0 мм выявило наличие в верхней головке вертикально отлитых образцов концентрированной усадочной раковины глубиной 10,5 мм, на 7,0 мм ниже которой располагается зона усадочной рассеянной пористости, описываемая эллипсоидным контуром высотой 12,0 и шириной 9,0 мм. В целом верхняя головка поражена усадочными дефектами на глубину до 30 мм, что составляет 21,4 % от высоты головки (до механической обработки). В рабочей части образца усадочные и другие дефекты отсутствовали.

Измерение твердости по высоте вертикального образца показало, что ее значения остаются постоянными (688 МПа) по всей высоте нижней головки и по рабочей части вплоть до высоты образца, равной 196 мм (на 68 мм ниже эллипсоидного контура усадочной пористости). Затем твердость непрерывно снижается и доходит до 595 мм в точке, отстоящей на 10 мм от нижней границы проявления усадочной пористости (в зоне усадочных дефектов твердость не измеряли). В то же время твердость по всей длине горизонтально отлитых образцов оказалась одинаковой (724 МПа).

Результаты испытаний механических свойств образцов, отлитых вертикально и горизонтально, существенно отличаются: последние обладают более высокими и стабильными характеристиками по всей длине, что позволяет рекомендовать методику горизонтальной заливки для оцен-

ки механических свойств, не только литейных алюминиевых сплавов, но и сплавов других систем.

Более высокий уровень свойств горизонтальных образцов объясняется спецификой заполнения полости литейной формы и лучшими условиями питания в процессе кристаллизации металла, что подтверждается более высокими значениями плотности

Влияние ЛПС на качество отливок подтвердилось при литье поршня двигателя внутреннего сгорания. В процессе эксплуатации поршень работает в экстремальных условиях, испытывая сложное температурно-силовое воздействие: воспринимает усилия от давления газов и сил инерции, передает боковое давление от нормальной силы на стенку цилиндра, обеспечивает герметичность внутрицилиндрового пространства с целью его уплотнения от прорыва газов из цилиндра в картер и ограничения доступа в него масла и воздуха, обеспечивает отвод тепла во избежание перегрева двигателя. Вследствие высоких значений максимального давления газов и частоты рабочих циклов, особенно в многооборотных двигателях, характер нагрузки на поршень близок к ударному. Силы инерции в многооборотных двигателях по величине незначительно уступают силам давления газов, а иногда и превышают их.

Мощность, долговечность, надежность и экономичность двигателя, угар масла, токсичность выхлопных газов, шум и другие эксплуатационные параметры в значительной степени зависят от качества поршней, которое определяется используемыми для их изготовления материалами и технологиями.

Поршень представляет собой деталь типа стакан, причем его размеры и отношение высоты к диаметру определяются требуемой для каждого конкретного двигателя мощностью.

В настоящее время поршни изготавливают в основном из алюминиево-кремниевых сплавов эвтектического (от 11...13 до 17...25 % Si) состава. При массовом производстве на автозаводах поршни обычно получают литьем в металлические формы (кокиль) с вертикальным разъемом при расположении детали доньшком вниз. Внутренняя поверхность поршня обычно оформляется разъемным выемным стержнем. Заливка и питание отливки в процессе кристаллизации осуществляется с помощью вертикальной щелевой ЛПС при подводе металла по боковой цилиндрической поверхности стенки поршня, причем ее масса доходит до 50 % от массы отливки.

Оснастка и технология литья была отработана на поршнях одной из модификаций автомобиля «Икарус» (высота поршня 60 мм, диаметр = 76,5 мм, толщина доньшка 6,3 мм), для чего была изготовлена специальная оснастка. Для оформления наружной поверхности поршня изготавливается неразъемный кокиль в виде цилиндра с дном (вытряхной кокиль) и стержневой ящик, состоящий из двух половинок с вертикальным разъемом между ними. Этот ящик предназначен для изготовления разового песчаного стержня, служащего для оформления внутренней поверхности поршня, включая бобышки с отверстиями в них под палец, в котором устроена верхняя литниково-питающая система, не соприкасающаяся со стенкой кокиля, что усиливает ее питающие характеристики. Стержневой ящик изготавливается из вышедшего из строя поршня путем его разрезки в вертикальной плоскости на две симметричные по-

ловины, в каждой из которой находится бобышка, и помещения между ними при формовке стержня фигурной пластины, служащей для компенсации уменьшения диаметра на толщину разреза поршня.

Материалом для песчаного стержня, формирующего внутреннюю полость поршня, являлась химико-твердеющая смесь. Рабочий сплав готовили в электрической печи сопротивления по стандартной для литейных алюминиевых сплавов системы Al-Si доэвтектического. После проведения требуемых металлургических операций и достижения необходимой температуры сплав заливали в заранее собранную литейную форму – кокиль с установленным в нем песчаным стержнем. После затвердевания металла и удаления отливки из кокиля из поршней удаляли песчаные стержни. Термическую обработку поршней производили по режиму Т6 (нагрев под закалку до температуры 515 ± 5 °С, выдержка 6 ч, охлаждение в воде; последующее старение в течение 4 ч при температуре 200 ± 5 °С / (473 ± 5 К), охлаждение на воздухе).

Измерение твердости по доньшку термообработанных поршней показало среднюю величину $HB_{\text{экср}} = 1210$ МПа, что на 27,0 % больше требований ГОСТ 1583–89 для сплава-аналога АК9М2. Расчетное значение временного сопротивления $\sigma_{\text{в.расч}}$ составило 248 МПа ($\sigma_{\text{в.расч}} = HB_{\text{экср}} : K = 1210 : 4,87 = 248$ МПа), что на 27,2 % больше требований ГОСТ 1583–89 для сплава-аналога АК9М2.

При осмотре обработанных поверхностей было установлено полное отсутствие на них, а следовательно, и в объеме отливки газовой пористости. Известно, что при поражении пористостью отливок из алюминиевых сплавов снижаются их механические свойства, а в случае работы под давлением снижается и герметичность. Излом стенки и доньшка поршней показал типичную для специально обработанного натрийсодержащим модификатором сплава картину вязкого разрушения, а угол изгиба фрагмента стенки поршня до его разрушения составил 65°, что свидетельствует о достаточно высокой вязкости разрушения и пластичности, связанной с высокой степени измельчения эвтектики. Последнее при изучении микроструктуры подтвердилось.

Высокая плотность сплава, полученного из переплава вышедших из строя поршней, и высокая степень его модифицирования подтвердили предположение авторов о том, что в данном случае можно избежать операций рафинирования и модифицирования.

В отличие от классической ЛПС, обычно применяющейся при литье поршней, при которой щелевой питатель располагается вертикально по всей высоте боковой поверхности детали и масса которого составляет до 50 % массы собственно отливки, в разработанной авторами технологии ЛПС практически отсутствует, а заливка металла производится через «юбку» поршня. При этом черновая масса литого поршня вместе с ЛПС, литейными допусками и припусками на механическую обработку (0,13 кг) всего на 11 % превышает массу детали в механически обработанном состоянии (0,28 кг). Исключение щелевого подвода металла существенно уменьшает трудоемкость механической обработки отливки, так как исключается операция отрезания щелевого подвода с одной поршня и такой же щели с его противоположной стороны.

Влияние конструкции ЛПС было изучено при литье ротора. Для изготовления из труднообрабатываемых жа-

ропрочных сплавов высокоточных деталей сложной геометрии, сочетающей массивные и тончайшие элементы, которые в процессе эксплуатации в составе мощных энергетических устройств работают в экстремальных силовых и температурных режимах, применяют единственно возможный в этом случае способ – литье по выплавляемым моделям (ЛВМ). При этом вследствие исключительно высоких требований к качеству таких отливок (требуется практически полное отсутствие любых литейных дефектов) они подвергаются целому ряду отсеивающих контрольных процедур, в результате проведения которых из-за выявления различных дефектов бракуется большое количество деталей (в отдельных плавках – почти 100 %).

Такая же ситуация возникла и при ЛВМ из жаропрочных сплавов высокоточной фасонной отливки – деталей типа ротор, представляющей собой деталь в форме диска.

На качество литых изделий влияет значительное количество факторов и одним из эффективных средств количественной оценки этого влияния является метод экспертных оценок [2], основанный на априорном выявлении значения отдельных факторов на возникновение того или иного дефекта. С этой целью была разработана анкета экспертных оценок, в которой были приведены выявляемые на детали дефекты (8 видов на отливках из обоих сплавов) и которые были приняты за функции (суммарный брак по ним достигал почти 100 %). В качестве независимых факторов, ставших возможными причинами появления этих дефектов, были взяты отмеченные в технологии параметры литья (21 параметр для отливок из сплава № 1 и 19 – для отливок из сплава № 2). Все число экспертов было разделено на 5 групп по служебному признаку: 1 – научные сотрудники, 2 – специалисты отдела главного металлурга предприятия, 3 – технологи, 4 – мастера и 5 – администрация литейного цеха. Каждый эксперт, полагаясь на свой опыт, внес в анкету соответствующие числовые ранги в графах, показывающих, с его точки зрения, связь рассматриваемого фактора с каким-либо дефектом. При заполнении анкет не допускалось повторение числовых рангов по виду дефекта, за исключением случаев, когда группе факторов (от 2 до 11) присваивался соответствующий средний ранг, который вычислялся как среднее арифметическое группы по формуле

$$a_i = \frac{\sum_{n=x_k}^{x_p} a_n}{(x_p - x_{k-1})}$$

В случаях когда эксперты какой-либо группы в целом по группе оценивали какое-то число факторов, но у отдельных экспертов некоторые из этих факторов не отмечались как значащие, анкета заполнялась средними рангами для всей группы не оцененных факторов, вычисленных для равнозначных факторов. В результате проведения соответствующей математической обработки анкет

было построено 96 гистограмм ранговой оценки влияния учитываемых факторов на появление конкретных дефектов как по каждой группе экспертов, так и по обобщенному коллективу. Конечный анализ показал, что большую часть дефектов основная группа экспертов отнесла на счет конструкции ЛПС отливки. Действительно, проведенное, казалось бы незначительное, изменение некоторых ее элементов и связанная с этим небольшая корректировка технологического процесса обеспечили сто процентную годность отливок по рентгеновскому просвечиванию, а также в 2,5...3,0 раза уменьшили отсев деталей другими методами контроля. Кроме того, в результате изменения конструкции ЛПС расход дорогостоящих сплавов уменьшился на 20...25 %.

В результате проведения описанных и других мероприятий улучшилось качество цельнолитых роторов и выход годного повысился до 90 %.

Наконец, существенное влияние устройства ЛПС на качество ответственной отливки летательного аппарата – детали типа кронштейн, отливаемой на двух разных предприятиях из сплава АК7 в кокиль, подтвердилось еще в одном случае. По технологии 1 была принята щелевая ЛПС, подводящая металл в нижнюю часть отливки через наклонный стояк в вертикальный цилиндрический металлоприемник посредством вертикальной щели. Кокиль в процессе заливки находился в стационарном состоянии. При литье детали по технологии 2 кокиль кантовали на 30...45° и заливку производили в стояк, подводящий металл в верхнюю часть отливки. В обоих случаях массивные узлы отливки подпитывали прибылями. Сплав готовили по стандартной технологии.

Испытание механических свойств отливок производили после термообработки по режиму Т6 на вырезанных из них образцах (по 100 шт. от деталей, отлитых по разным технологиям). Анализ результатов испытаний показал, что детали, отлитые по технологии 2, показали более высокий уровень механических свойств ($\sigma_{в.ср} = 305$ МПа, $\delta_{ср} = 5,5$ %), чем детали, отлитые по технологии 1 ($\sigma_{в.ср} = 275$ МПа; $\delta_{ср} = 2,5$ %).

Изучение всех факторов, которые могли бы оказать влияние на механические свойства отливок, показало, что главным из них является устройство ЛПС. Направленная кристаллизация металла, осуществляемая по технологии 2, обеспечивает получение отливок с меньшим количеством усадочных дефектов.

Библиографический список

1. Крушенко, Г. Г. Плотность и механические свойства силуминов, термически обработанных в жидком состоянии / Г. Г. Крушенко, З. А. Василенко // Расплавы. 1988. Т. 2. Вып. 6. С. 67–69.
2. Элти, Дж. Экспертные системы: концепции и примеры / Дж. Элти, М. Кумбс. М.: Финансы и статистика, 1987. 191 с.

G. G. Krushenko, S. N. Reshetnikova

INFLUENCE OF GATING-SUPPLY SYSTEM ON MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ENGINE MOULDED PIECES

It's established that the location of castings in cavity of mould and the construction of gating system both influence on the level of mechanical properties of cast particles

УДК 621.785.

А. Е. Михеев, А. В. Гирн, С. С. Ивасев, Р. В. Карпов

УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ

Рассмотрен механизм упрочнения металлических поверхностей при обработке концентрированными источниками энергии. Приведены результаты исследований по упрочнению образцов из серого чугуна электродуговым способом. Показано, что микротвердость поверхностного слоя упрочненных чугунов возросла на 20 % по сравнению с обычной упрочняющей термообработкой.

Развитие промышленности неразрывно связано с созданием новых материалов с высокими технико-экономическими показателями. Одной из наиболее важных задач машиностроения является улучшение механических характеристик металлических деталей, работающих в условиях изнашивания. Эффективное решение этой задачи заключается во внедрении современных технологических методов, позволяющих обеспечить оптимальное состояние поверхностного слоя материала. Для деталей, работающих в условиях трения, наиболее важными являются такие физико-механические свойства, как твердость и контактная выносливость поверхности при сохранении пластичности основной массы изделия. Поэтому целесообразно повышение характеристик не всего материала детали, а только ее поверхностного слоя.

Анализ современных методов упрочнения поверхностей стальных деталей показывает, что одним из перспективных направлений является упрочнение с использованием концентрированных потоков энергии. Это обусловлено тем, что основным направлением развития новых методов обработки является стремление повысить скорости нагрева, охлаждения и деформации. Это позволяет повысить концентрацию дефектов кристаллической решетки в обработанных материалах, изменить их распределение в материале и в результате улучшить их механические и другие важные для техники свойства материалов.

С 70-х г. для упрочнения поверхности металлов начинают применять лазерные, а затем электронно-лучевые и плазменные источники нагрева. Общим для этих методов является подвод тепловой энергии в заданную точку поверхности, последовательный нагрев соседних точек благодаря относительному перемещению теплового пучка и заготовки, скоростное охлаждение нагретого слоя кондуктивным теплоотводом во внутренние слои детали. Работами в этой и смежных областях занимались такие отечественные ученые, как Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, В. С. Крапошин, И. Н. Кидин, Л. И. Миркин, В. С. Коваленко, А. Г. Григорьянц и др.

С помощью концентрированных потоков энергии можно нагревать материалы со скоростями, на несколько порядков превышающими скорости нагрева при всех ранее известных видах обработки, обрабатывать очень малые поверхности, миниатюрные детали, наружные и внутренние поверхности деталей, создавать отверстия с упрочненной поверхностью и т. д.

Однако вопросы, касающиеся как механизма изменения структуры металла при обработке, так и областей практического применения термоупрочнения с помощью концентрированных потоков энергии, еще не реше-

ны. Прежде всего не получены количественные закономерности изменения структуры и свойств металлов при такой обработке. Для практического использования упрочняющей обработки с помощью концентрированных потоков энергии необходимо установить области, где они могут быть применены с большей эффективностью, чем существующие традиционные методы обработки. Новые методы обработки материалов тесно связаны с исследованиями физической природы процессов, возникающих при термическом упрочнении сплавов.

Наряду с достоинствами, перечисленные методы упрочнения поверхности имеют ряд недостатков, наиболее важными из которых являются высокая стоимость оборудования и как следствие – высокая себестоимость обработанной поверхности.

Из анализа методов поверхностного упрочнения с помощью концентрированных потоков энергии следует, что электрическая дуга, обладая относительно низкой стоимостью обработки, по плотности мощности сопоставима с плазменной струей. Это позволяет использовать обработку электрической дугой для упрочнения металлических поверхностей, что и определило цель и поставленные задачи исследования.

Под концентрированным потоком энергии следует понимать энергетический поток, воздействующий на локальный участок поверхности с плотностью тепловой мощности более 10^3 Вт/см² [1, 2]. На практике для упрочнения поверхности чаще всего используют лазерное излучение, электронный пучок и плазменные потоки [1]. Несмотря на различия физических процессов, лежащих в основе того или иного способа скоростного нагрева, всем им присуща то, что фазовые и структурные превращения протекают в условиях, далеких от равновесных [3]. Особенностью обработки концентрированными потоками энергии является сопровождающая данный процесс закалка объемов изделия, нагретых до температур выше критических точек сплава [4]. Сразу после перемещения источника нагрева на новый участок поверхности обрабатываемого изделия начинается охлаждение нагретого объема. Тепло частично рассеивается в окружающем пространстве за счет лучеиспускания, но главным образом отводится вглубь металлов и сплавов. С учетом того, что нагретый объем составляет незначительную часть всего изделия, скорость отвода тепла (скорость охлаждения) оказывается выше критической скорости закалки не только для средне- и высокоуглеродистых сталей, но и для сталей с низким содержанием углерода и даже технически чистого железа [5]. Таким образом, для упрочнения не требуется принудительное охлаждение нагретых объе-

мов, т. е. происходит автозакалка. Это является одним из существенных преимуществ поверхностного упрочнения сталей, чугунов и других сплавов локальными источниками энергии.

Нагрев концентрированными потоками энергии может осуществляться как с оплавлением поверхности обрабатываемого изделия, так и без оплавления. Оплавление в сочетании с последующей автозакалкой представляет собой особый вид термической обработки – закалку из жидкого состояния. Сущностью ее является быстрое затвердевание тонких поверхностных слоев с образованием в них метастабильных структур. Поскольку формирование тонких структур часто приводит к повышению эксплуатационных характеристик изделий, закалка из жидкого состояния прочно вошла в арсенал термической обработки [6]. При такой закалке на поверхности обрабатываемого изделия могут появляться мелкие неровности как следствие газовой выделенности и усадки металла при его затвердевании. Правильный и тщательный подбор режима обработки часто позволяет ограничить эти неровности несколькими десятками микрометров. Последующая механическая обработка позволяет устранить эти дефекты.

При рассмотрении механизмов упрочнения различают четыре основных пути возможного упрочнения поверхностного слоя [7]:

- структурное упрочнение, достигаемое высокоскоростным нагревом тонкого поверхностного слоя, до температур, не превышающих температур фазового превращения;

- упрочнение путем поверхностной закалки с получением метастабильного фазового состояния и последующим старением или отпуском;

- упрочнение путем нагрева поверхностного слоя до температур, превышающих температуру плавления с последующей ускоренной кристаллизацией, при которой достигается образование сверхмелкодисперсной кристаллической структуры, аморфного состояния вещества либо иных метастабильных состояний закристаллизованной поверхности;

- упрочнение путем поверхностного легирования слоя на основе протекания микрометаллургических процессов в поверхностном расплаве и диффузионного взаимодействия легирующего компонента в слое с основной сплава в результате оплавления поверхности изделия вместе с предварительно нанесенным на поверхность слоем легирующего компонента.

Особенности фазовых превращений при обработке концентрированными потоками энергии заключаются в следующем: скорость охлаждения при обработке поверхностного слоя, как показывают расчеты, составляет 10^4 – 10^6 °C/с, а в ряде случаев и выше [5]. Такое сочетание высокой температуры нагрева и большой скорости охлаждения не может не сказываться на протекании фазовых превращений в поверхностных слоях. В этих условиях фазовые превращения начинаются и заканчиваются выше или ниже равновесных температур. Теоретическая (равновесная) температура T_0 полиморфного превращения для любых конечных скоростей нагрева и охлаждения растягивается в интервал температур. Величина этого

интервала растет с увеличением скорости нагрева (охлаждения).

Ранее проведенные работы по электродуговому упрочнению доэвтектоидных сталей [8] показали, что зона нагрева имеет четкую границу раздела основного металла и обработанной поверхности. Поверхностный слой имеет достаточно однородную дендритно-столбчатую, ориентированную в направлении теплоотвода микроструктуру и состоит преимущественно из мартенсита с прослойками троостита. Микротвердость этого слоя зависит от содержания углерода и в стали 20 составляет 4 ГПа, а в стали 40 – около 7,5 ГПа. При нагреве с оплавлением поверхности на эвтектоидной стали У8 в зоне нагрева различается два слоя. Первый, нагреваемый до расплавления, имеет дендритно-столбчатую микроструктуру, состоящую из мартенсита и остаточного аустенита. Микротвердость этого слоя составляет 7,3–9,5 ГПа. Второй слой состоит из мартенсита с меньшей твердостью.

В данной работе исследовали влияние технологических параметров обработки электрической дугой на структуру и свойства чугунов. Чугуны являются особым классом железоуглеродистых материалов, используемых обычно в виде отливок благодаря хорошим литейным качествам. Однако в последние десятилетия эти сплавы все чаще вытесняют из эксплуатации традиционно применяемые там стали. Можно усмотреть, по крайней мере, две причины этого явления. Первая из них чисто экономическая, согласно которой формообразование заготовки литейным способом имеет неоспоримое преимущество в сравнении с ковкой и объемной штамповкой, не говоря уже о механической обработке. Кроме того, было доказано, что чугун так же, как и сталь, можно термически упрочнять и, в том числе, поверхностным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ). При этом оказывалось, что основная цель поверхностной закалки – повышение твердости и износостойкости изделия в чугунах достигается ничуть не хуже, чем в сталях. [9].

Обработка проводилась на образцах из серого чугуна СЧ24-44 и СЧ32-53 в исходном отожженном состоянии. Структура серого чугуна состоит из металлической основы с графитом пластинчатой формы, вкрапленным в эту основу. Металлическая основа серых чугунов формируется из аустенита при эвтектоидном распаде и может быть перлитной, ферритной и ферритно-перлитной. Механические свойства серых чугунов зависят от свойств металлической основы и, главным образом, от количества, формы и размеров графитных включений. Перлитная основа обеспечивает наибольшие значения показателей прочности и износостойкости.

Исследования проводили на экспериментальной установке [10]. Между поверхностью детали и вольфрамовым электродом, находящимся под напряжением, посредством искрового высокочастотного разряда возбуждается электрическая дуга. Для защиты электрода и нагретого участка поверхности детали от окисления используется инертный газ – аргон. Установка оснащена сканирующей магнитной системой, позволяющей увеличить производительность обработки. Ток в управляющих обмотках сканирующего устройства изменялся от 2 до 5 А, частота тока 50 Гц. Ширина обработки за один проход со-

ставляла 10 мм. Упрочнение поверхности необходимой площади достигалось перемещением пятна нагрева с о скоростью от 0,01 до 0,5 м/с по заданной траектории. Термический цикл в поверхностном слое детали регулировался изменением тока дуги (100-250 А) при напряжении 46 В. Обработка проводилась на режимах с оплавлением поверхностного слоя и без оплавления.

Микроструктуру и размер зерен исследовали при 800–1000-кратном увеличении на оптическом микроскопе МИМ-7. Рентгеноспектральный анализ выполняли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2, электронно-микроскопический анализ – на растровом электронном микроскопе РЭМ-200. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 1 МПа. Износостойкость оценивали на машине трения по величине абразивного износа. Коррозионную стойкость определяли по стандартной методике.

Результаты исследования обработки серых чугунов показали, что зона нагрева на предварительно отожженных или нормализованных образцах имеет четкую границу раздела основного металла и обработанной поверхности (рис. 1). Поверхностный слой имеет достаточно однородную цементитную, ориентированную в направлении теплоотвода микроструктуру. Микротвердость этого слоя колеблется от 850 до 1100HV. Далее следует слой, состоящий из перлитно-цементитной смеси с включениями пластинчатого графита. Микротвердость этого слоя колеблется от 380 до 500 HV. Далее идет основной металл, который имеет перлитную структуру, а микротвердость этого слоя колеблется от 200 до 260 HV. Общая глубина закаленного слоя в зависимости от режима обработки у чугуна СЧ 24–44 колеблется от 220 мкм до 460 мкм, у

СЧ 32–52 глубина упрочненного слоя изменяется от 300 мкм до 800 мкм.

При увеличении скорости обработки микротвердость (рис. 2) сначала начинает расти, так как скорость охлаждения поверхности увеличивается, затем происходит ее снижение вследствие уменьшения количества теплоты, которая передается поверхности металла от электрической дуги. При увеличении скорости перемещения электрической дуги наблюдается уменьшение глубины упрочненной зоны (рис. 3), которое можно объяснить уменьшением теплового потока вследствие уменьшения времени воздействия дуги на данный участок поверхности металла. Оптимальные скорости обработки лежат в интервале от 0,03 до 0,06 м/с, при котором достигается максимальная микротвердость при незначительном изменении глубины поверхностного слоя (рис. 4, 5). Увеличение тока приводит к заметному росту глубины упрочненной зоны, при этом микротвердость снижается.

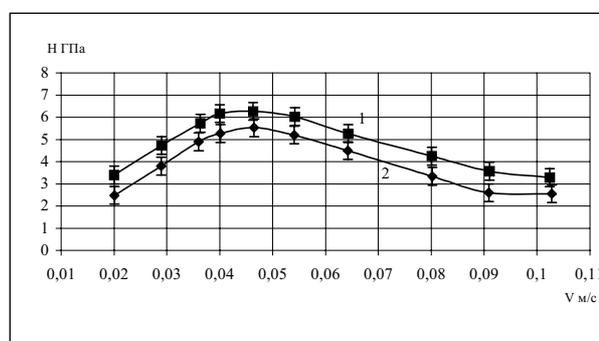


Рис. 2. Зависимость микротвердости чугуна СЧ 24-44 от скорости обработки: 1 – I = 130 А; 2 – I = 150 А

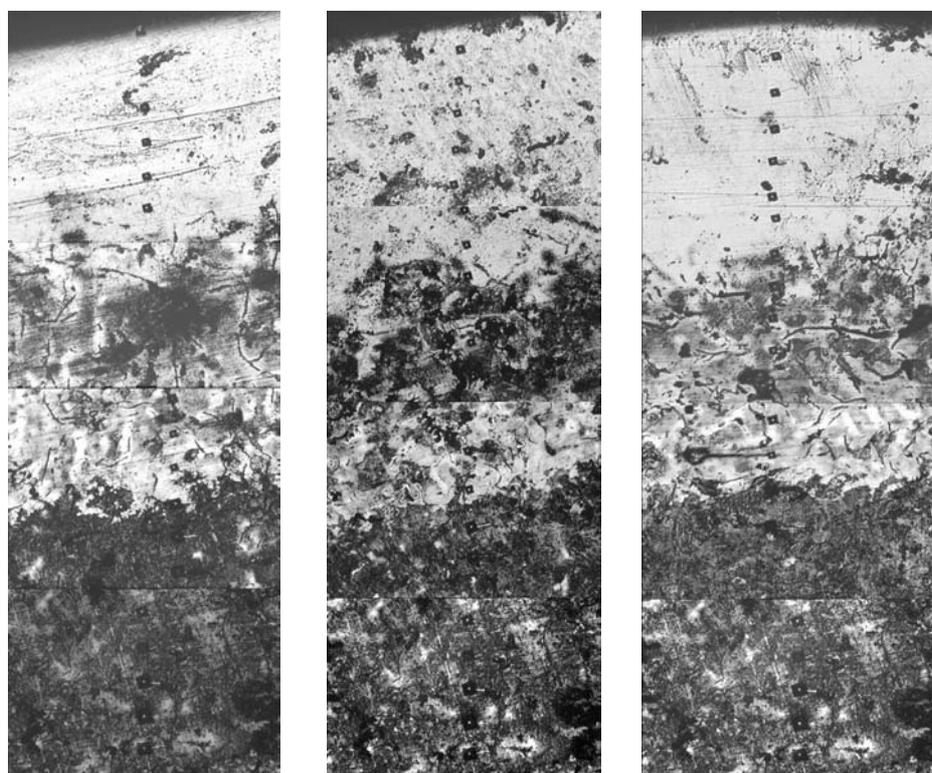


Рис. 1. Микроструктура поверхности упрочненного чугуна СЧ 32-52 (× 125):
а – I=100А, б – I=130А, в – I=150А, v = 0.03 м/с = const

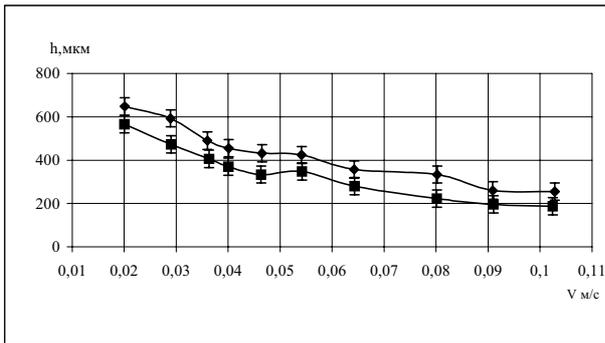


Рис. 3. Зависимость глубины упрочненного слоя чугуна СЧ 24-44 от скорости обработки:
1 – I = 130 А; 2 – I = 150 А

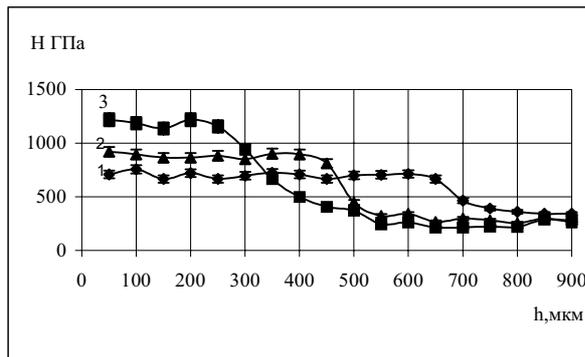


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине чугуна СЧ 32-52 при скорости обработки:
1 – $v = 0,03$ м/с, 2 – $v = 0,05$ м/с, 3 – $v = 0,06$ м/с

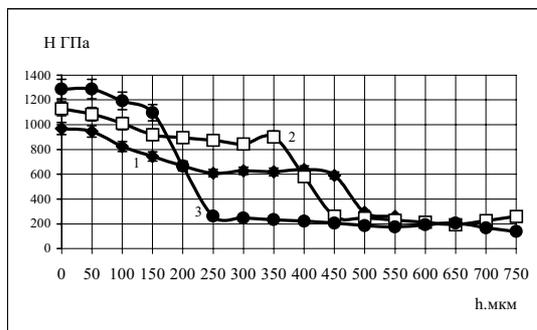


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине чугуна СЧ 24-44, скорость обработки:
1 – $v = 0,03$ м/с, 2 – $v = 0,05$ м/с, 3 – $v = 0,06$ м/с

Результаты исследования износостойкости полученных образцов (рис. 6) показали, что износостойкость увеличилась в 4 раза по сравнению с необработанным материалом. Коррозионная стойкость упрочненных образцов в среднем увеличилась в 2 раза.

Предлагаемый метод упрочнения металлических поверхностей можно использовать для деталей машин и механиз-

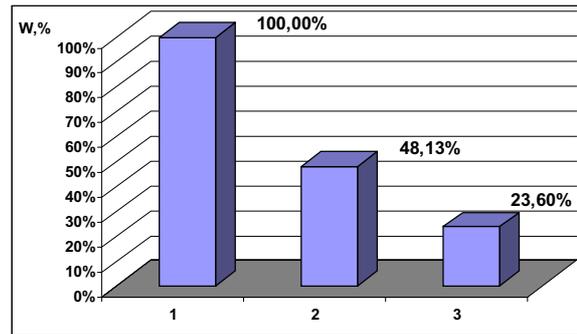


Рис. 6. Относительная величина износа поверхности образцов: 1 – необработанный образец; 2 – шлифованный упрочненный образец; 3 – нешлифованный упрочненный образец

мов, эксплуатирующихся в условиях повышенного износа и в агрессивной среде, как вид финишной обработки.

Библиографический список

1. Новое в технологии получения материалов / под ред. Ю. А. Осипяна и А. Хауфа. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
2. Коваленко, В. С. Прогрессивные методы лазерной обработки материалов / В. С. Коваленко. Киев: Вища школа, 1985. 243 с.
3. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. М.: Машиностроение, 1989. 480 с.
4. Леонтьев, П. А. Лазерная обработка металлов и сплавов / П. А. Леонтьев, М. Г. Хан, Н. Т. Чеканова. М.: Металлургия, 1986. 142 с.
5. Миркин, Л. И. Физические основы обработки материалов лучами лазера / Л. И. Миркин. М.: Изд-во МГУ, 1975. 393 с.
6. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
7. Кан Р. У. Сплавы, быстрозакаленные из расплава / Р. У. Кан // Физическое металловедение: в 3 т. / под ред. Р. У. Кана, П. Хаазена. М.: Наука, 1964. 487 с.
8. Михеев, А. Е. Поверхностное упрочнение стальных деталей сжатой электрической дугой / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, С. С. Ивасев, В. В. Стацур, Н. А. Терехин // Сварочное производство. 2003. № 2. С. 24–27
9. Домбровский, Ю. М. Плазменное поверхностное упрочнение графитизированных чугунов / Ю. М. Домбровский, Е. В. Анищенко // Вестник ДГТУ. 2001. Т. 1. № 1(7) С. 65–70.
10. Михеев, А. Е. Упрочнение стальных поверхностей электрической дугой / А. Е. Михеев, С. С. Ивасев, В. В. Стацур, А. В. Гирн // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 8. С. 88–90.

A. E. Mikheev, A. V. Girm, S. S. Ivasev, R. V. Karpov

HARDENING OF METAL SURFACES BY ELECTRICAL ARC

In a paper the mechanism of hardening of metal surfaces is considered at handling by the concentrated power sources. The outcomes of researches on hardening are reduced is exemplar from grey pig-iron by an electric arc mode. Is shown that the microhardness of a surface stratum hardened pig-iron has increased by 20 % on a comparison with usual hadening by heat treatment.

А. В. Мурыгин, С. В. Балайтисов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТЫ СТЫКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ПО ИНФОРМАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛА ДАТЧИКА СТЫКА

Рассматривается задача определения координаты положения стыка в процессе электронно-лучевой сварки. Предлагается эффективная методика обработки статической характеристики и определения координаты стыка.

Одной из основных задач, решаемых при построении автоматических систем наведения электронного луча на стык, является определение координаты стыка и величины ухода стыкового соединения. В основе всех методик определения координаты стыка лежит анализ и обработка статической характеристики, полученной при помощи датчика стыка, где в качестве датчика стыка может быть использован рентгеновский датчик или коллектор вторичных электронов. Статическая характеристика является одной из основных математических зависимостей, составляющих модель датчика. Она показывает зависимость амплитуды сигнала датчика стыка от места положения луча относительно стыка. Если центр координат, описывающих положение луча, совместить с осью стыка, а ось X расположить перпендикулярно оси стыка, то для нормального распределения плотности тока луча на поверхности обрабатываемых деталей статическая характеристика описывается выражением [1]

$$J_d = W \left[1 - \frac{(1 - K_s)}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-0.5h_s}^{0.5h_s} e^{-\frac{(x-\varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}} dx \right], \quad (1)$$

где W – излучение с поверхности свариваемых деталей, ε_x – координаты математического ожидания электронов по оси X ; σ_x – среднее квадратическое отклонение электронов от центра пучка по оси X ; K_s – коэффициент, учитывающий неоднородность поверхности свариваемого изделия и наличие стыка; h_s – ширина зазора стыка.

На рис. 1 приведены статические характеристики, определяемые выражением (1) для различных отношений σ_x/h_s .

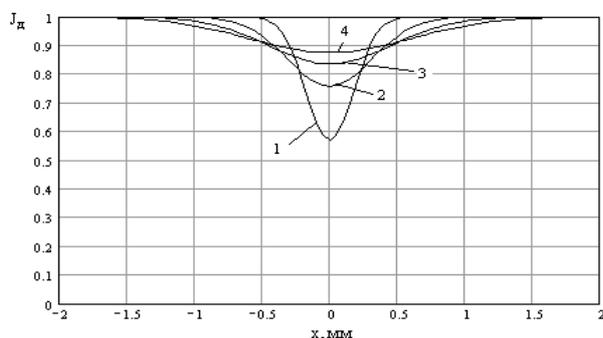


Рис. 1. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения J_d от места положения луча на стыке при $h_s = 0,3$ мм; 1 – $y_x/h_s = 0,5$; 2 – $y_x/h_s = 1$; 3 – $y_x/h_s = 1,5$; 4 – $y_x/h_s = 2$

В большинстве устройств слежения за стыком для выделения информации сигнал датчика стыка подвергают обработке различными методами. Наиболее характерным для систем с поисковым сканированием является фазоимпульсный метод выделения сигнала [1]. При этом методе

импульс от стыка отделяется от постоянной составляющей, инвертируется и нормируется по амплитуде.

При невысоком уровне помех, когда амплитуда сигнала A_c в 5–10 раз превышает амплитуду помехи, определение координаты стыка x_c не вызывает затруднений. В качестве информационного параметра обычно используют моду распределения x_{\max} функции сигнала, которой соответствует максимальное значение амплитуды сигнала от стыка (рис. 2).

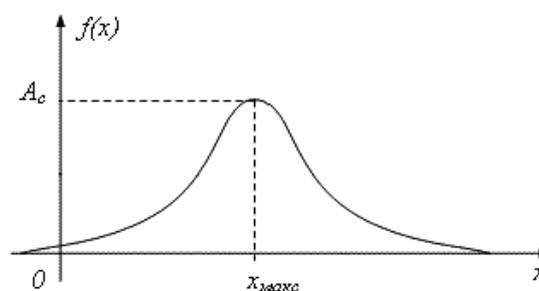


Рис. 2. Определение координаты стыка как моды распределения

Для уменьшения вероятности пропуска сигнала в схеме управления устанавливают пороговый уровень обнаружения сигнала, равный 0,5–0,75 A_c , что приводит к возникновению методической погрешности определения координаты стыка.

Нестабильность основных технологических параметров электронно-лучевой сварки – ускоряющего напряжения, тока электронного луча, тока фокусирующей системы, наличие царапин и риск вблизи стыкового соединения, уменьшение ширины зазора стыка, приводят к тому, что функция сигнала, полученная при помощи датчика стыка, может быть значительно искажена помехами (рис. 3).

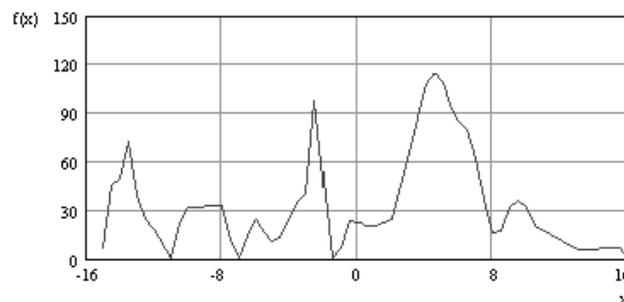


Рис. 3. Функция сигнала от стыка на фоне высокого уровня импульсных помех

В этом случае использование в качестве информационного параметра моды распределения приведет к ошибке в определении координаты стыка.

В качестве другого информационного параметра, устойчивого к различного рода импульсным помехам, может быть выбрана оценка в виде математического ожидания x_{mo} :

$$x_{mo} = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx, \quad (2)$$

где $f(x)$ – нормированная плотность распределения функции сигнала от стыка, условие нормирования задано в виде $A \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$.

Для дискретных отсчетов (рис. 4)

$$x_{mo} = \sum_{i=1}^m x_i \frac{n_i}{n} \Delta x, \quad (3)$$

где m – число интервалов разбиения функции сигнала от стыка по оси X ; $\Delta x = x_i - x_{i-1}$ – ширина интервала разбиения; n_i – число отсчетов датчика стыка в точке x_i ; $n = \sum_{i=1}^m n_i$ – объем выборки.

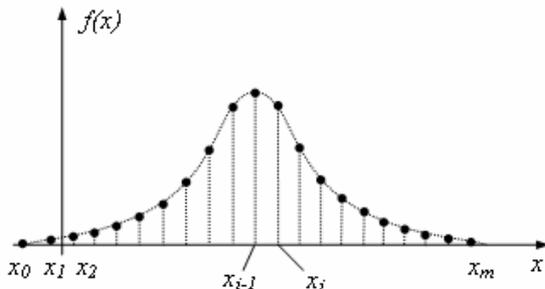


Рис. 4. Определение координаты стыка по дискретным отсчетам, полученным при помощи датчика стыка

Среднее квадратическое отклонение рассеяния оценки математического ожидания $\sigma_{x_{mo}}$ зависит от среднего квадратического отклонения разброса усредняемых отсчетов σ_{x_i} функции распределения сигнала от стыка и объема выборки n :

$$\sigma_{x_{mo}} = \frac{\sigma_{x_i}}{\sqrt{n}}. \quad (4)$$

Достоинством данного метода определения координаты стыка является то, что при усреднении одновременно уменьшаются все случайные погрешности вне зависимости от их происхождения. Однако существуют распределения, для которых математическое ожидание не может быть определено, например, распределение Коши. Оценка координаты стыка для такого распределения будет иметь большую погрешность.

Координата стыка может быть найдена как точка симметрии, которая делит площадь, ограниченную кривой $f(x)$ нормированной плотности распределения функции сигнала, пополам (рис. 5). Эта точка называется 50 %-й квантилью распределения, или медианой x_m , и определяется выражением

$$\int_{-\infty}^{x_m} f(x)dx = 0,5. \quad (5)$$

Положительными аргументами в пользу данного метода определения координаты стыка является то, что понятие центра симметрии существует для всех видов распределений и оценка координаты стыка как медианы x_m является устойчивой к помехам в виде случайных выбросов.

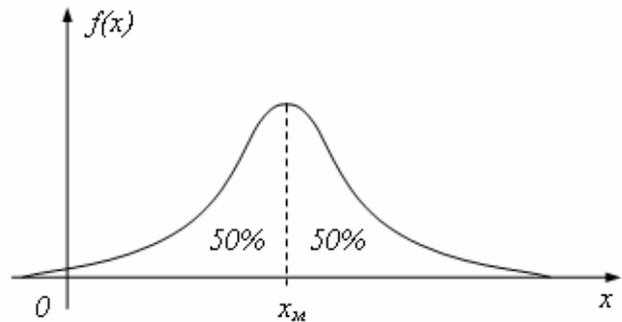


Рис. 5. Определение координаты стыка как центра симметрии распределения

Произведем оценку относительной эффективности определения координаты стыка при использовании в качестве оценки координаты стыка медианы распределения x_m и математического ожидания x_{mo} . Дисперсия D найденной по выборке объемом n координаты любой квантили соответствующей вероятности p может быть определяем по формуле [5]

$$D_{x_p} = \frac{p(1-p)}{n[f(x_p)]^2}, \quad (6)$$

где x_p – координата квантили, $f(x_p)$ – плотность распределения в точке x_p .

Так для медианы $p = 0,5$, $x_p = x_m$. Дисперсия

$$D_{x_m} = \frac{1}{4n[f(x_m)]^2}. \quad (7)$$

Например, для распределения Лапласа

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} e^{-\left|\frac{x\sqrt{2}}{\sigma}\right|} \quad (8)$$

плотность в центре распределения при $x = 0$

$$f(x_m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}}. \quad (9)$$

Отсюда дисперсия рассеяния оценки центра в виде медианы для распределения Лапласа

$$D_{x_m} = \frac{\sigma^2}{2n}, \quad (10)$$

где $\sigma = \sigma_{x_i}$.

Сопоставляя дисперсию оценки координаты стыка в виде медианы и в виде математического ожидания, при одинаковом объеме выборке n получаем, что оценка координаты стыка медианой в два раза эффективней оценки в виде математического ожидания

$$E = \frac{D_{x_{mo}}}{D_{x_m}} = 2, \quad (11)$$

где E – относительная эффективность.

Для нормального распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

плотность в центре распределения при $x = 0$

$$f(x_m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}. \quad (13)$$

В этом случае дисперсия рассеяния оценки центра в виде медианы

$$D_{x_m} = \frac{\pi\sigma^2}{2n}. \quad (14)$$

Относительная эффективность

$$E = \frac{D_{x_{mo}}}{D_{x_m}} = \frac{2}{\pi} = 0,64. \quad (15)$$

Таким образом, для нормального распределения эффективность оценки x_m меньше чем x_{mo} .

В общем случае для класса экспоненциальных распределений, задаваемых аналитическим выражением вида

$$f(x) = Ae^{-|x|^\alpha}, \quad (16)$$

где α – показатель степени распределения, относительная эффективность оценки координаты стыка медианой по сравнению с математическим ожиданием может быть определена как [4]

$$E = \frac{\alpha^2 \Gamma(3/\alpha)}{[\Gamma(1/\alpha)]^3}, \quad (17)$$

где $\Gamma(z)$ – гамма-функция.

Для распределений с эксцессом ϵ от 3 до 8 может выражение (17) быть аппроксимировано с погрешностью 5–10 % функцией вида

$$E = 0,12\epsilon^{1,6}, \quad (18)$$

где $\epsilon = \mu_4/\sigma^4$, μ_4 – четвертый центральный момент распределения.

Следует отметить, что при снятии островершинных распределений дискретные отсчеты датчика стыка в центре распределения располагаются более плотно, в связи с этим медиана определяется более четко. У плосковершинных распределений отсчеты в центре распределения располагаются редко, и неопределенность медианы резко возрастает.

У симметричных двухмодальных распределений отсчеты группируются наиболее плотно в районе 25 %-й и 75 %-й квантилей – так называемых сгибов распределения (рис. 6). В результате этого для двухмодальных распределений с наименьшей дисперсией определяются координаты сгибов. Следовательно, для таких распределений наиболее эффективной будет оценка координаты стыка, определяемая как центр сгибов x_{sc} :

$$x_{sc} = \frac{x_{0,25} + x_{0,75}}{2}, \quad (19)$$

где $x_{0,25}$ – координата 25 %-й квантили, $x_{0,75}$ – координата 75 %-й квантили распределения.

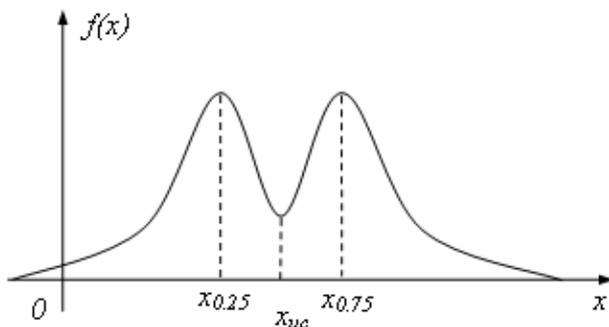


Рис. 6. Определение координаты стыка как центра сгибов распределения

Сопоставляя различные оценки определения координаты стыка, необходимо, кроме их эффективности, учитывать чувствительность этих оценок к действию различного рода помех. Ошибка в определении координаты сты-

ка зависит от координаты возможного искажения сигнала датчика стыка. С этой точки зрения оценка координаты стыка в виде математического ожидания x_{mo} слабо защищена от влияния помех – влияние помехи ослабляется лишь в \sqrt{n} раз. Квантильные оценки, напротив, являются защищенными от влияния побочных помех. Понижающей точность квантильных оценок, применение в методике обработки сигнала датчика стыка группирования дискретных отсчетов внутри интервалов разбиения Δx . Это приводит к возникновению постоянной составляющей со случайной амплитудой и ошибки в определении координаты стыка (рис. 7).

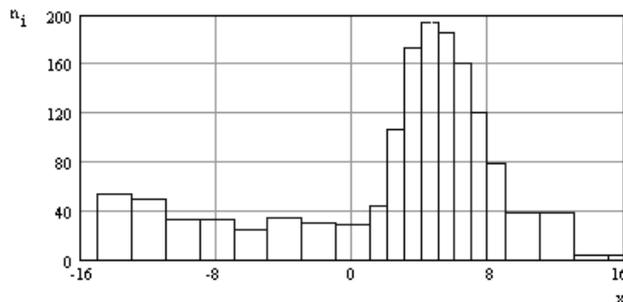


Рис. 7. Оптимальное группирование дискретных отсчетов датчика стыка

Защищенность квантильных оценок от импульсных помех возможно сочетать с уточнением среднего арифметического при увеличении объема выборки n , т.е. использовать смешанный метод определения координаты стыка как среднего арифметического 50 % центральных наблюдений $x_{ca0,5}$. Центральными считаются отсчеты, лежащие на интервале между 25 %-й и 75-й квантилями:

$$x_{ca0,5} = \int_{x_{0,25}}^{x_{0,75}} xf(x)dx. \quad (20)$$

Таким образом, несмотря на разнообразие методик оценки центра распределения, ни одна из них не может быть рекомендована в качестве универсальной по следующей причине – различные оценки имеют разную эффективность для различных видов распределений и помех. В условиях, когда еще нет данных о виде распределения и нет возможности выбрать наиболее эффективную оценку координаты стыка, можно рационально вычислить все пять оценок (x_m , x_{mo} , x_{sc} , $x_{ca0,5}$ и $x_{макс}$) и за оценку координаты стыка принять оценку x_{cp} , занявшую медианное положение в вариационном ряду, составленном из предыдущих оценок. Такую оценку можно считать достаточно эффективной, инвариантной к форме распределения и защищенной от помех.

Так, для приведенной статической характеристики (рис. 3) получаются следующие значения оценок центра распределения:

$$x_m = 4; x_{mo} = 2; x_{sc} = 2; x_{ca0,5} = 3; x_{макс} = 5; \quad (21)$$

$$x_{cp} = 3.$$

Получаем, что координата стыка равна 3.

Выводы:

1. Координата стыка может быть определена по информационным параметрам, вычисляемым по нормированной плотности распределения функции сигнала от стыка. В качестве информационных параметров может

быть выбрана мода распределения $x_{\text{макс}}$, математическое ожидание распределения $x_{\text{мо}}$, медиана распределения $x_{\text{м}}$, центр сгибов распределения $x_{\text{цс}}$ или среднее арифметическое 50 % центральных наблюдений.

2. Эффективность использования информационных параметров зависит от формы распределения и устойчивости к действию помех. Наложение слабо меняющейся в процессе измерения помехи приводит к смещению квантильных оценок, основанных на вычислении соотношения площадей, ограниченных кривой плотности. Импульсные помехи оказывают влияние на информационные параметры, использующие для расчета амплитуду сигнала.

3. В условиях, когда нет возможности выбрать наиболее эффективную оценку координаты стыка, рациональнее вычислить все пять информационных параметров – $x_{\text{м}}$, $x_{\text{мо}}$, $x_{\text{цс}}$, $x_{\text{ca}0,5}$ и $x_{\text{макс}}$, и за координату стыка принять

оценку $x_{\text{ср}}$, являющуюся медианой вариационного ряда, составленного из всех предыдущих оценок.

Библиографический список

1. Лаптенко, В. Д. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенко, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин, В. Я. Браверманн; САА. Красноярск, 2000.
2. Хараджа, Ф. Н. Общий курс рентгенотехники / Ф. Н. Хараджа. Л.: Энергия, 1966.
3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М.: Высш. шк., 1999.
4. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. Л.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. М.: Мир, 1976.

A. V. Murygin, S. V. Balajtisov

JOINT COORDINATE DETERMINATION FOR ELECTRON-BEAM WELDING USING SENSOR INFORMATION PARAMETERS

The article handle problem of joint coordinate determination during electron-beam welding process. Effective method for sensor characteristic analysis and joint coordinate determination was suggested.

А. В. Никитин, Е. В. Раменская, Е. В. Бургардт, Ю. А. Филиппов

ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СТАНКОВ

Рассмотрены вопросы состояния станочного парка страны, проблемы управления вибрационными процессами на основе имитационного моделирования с целью создания новых конструкций станков повышенной точности и конкурентоспособности.

Производство товарной продукции в различных отраслях народного хозяйства до сих пор продолжается с использованием устаревшего и физически изношенного технологического оборудования, имеющего малую производительность и рентабельность. Отсутствие современной технологии ускоренной диагностики технического состояния эксплуатируемого технологического оборудования с целью вывода его из работы не позволяет принимать обоснованные технические решения без риска значительных потерь производственных мощностей предприятий ведущих отраслей России. Кроме этого, снижение темпов создания новых станков привело к пороговому уровню, свидетельствующему о невозможности воспроизводства даже освоенных ранее прогрессивных конструкций металлорежущих станков.

Ежегодный отчет по мировому производству и реализации металлообрабатывающего оборудования показывает, что на протяжении последних 5 лет лидерами являются Япония и Германия, имеющие по 12 ведущих станкостроительных фирм, созданных ранее по плану Маршалла и входящих в число 30 лидирующих фирм – изготовителей станочной продукции в мире. При этом 2 лидирующие фирмы ежегодно реализуют станки от 1,0 до 1,5 млрд долларов каждая. Российские предприятия станкостроения в этих отчетах не упоминаются, поэтому основной целью Постановления Правительства РФ № 226 от 16.03.2000 являлось определение перспектив развития станкостроительной и инструментальной промышленности для того, чтобы вернуть Россию в лидирующую группу мировых производителей станков.

Следует заметить, что индикатором начала развития и успешного функционирования экономики страны является превышение в 2...3 раза темпов роста выпуска технологического оборудования по сравнению с темпами выпуска потребительской товарной продукции. Но пока в Российской Федерации заметных изменений в этом плане не наблюдается. Основные причины такого положения известны. Главной из них является низкая культура технологии проектирования и изготовления оборудования, особенно по показателям назначения. Консерватизм в станкостроении особенно опасен при освоении и создании новых знаний, базирующихся на фундаментальных основах классической механики [2; 6].

В настоящее время небольшое, казалось бы, ответвление общего машиностроения – станкостроение – испытывает бурный рост, особенно в Китае, в то же время у нас вопросы реальной модернизации производства оборудования отошли на второй план. Так, например, в связи с запуском в производство новых моделей автомашин, характер задач управления и синхронизации мате-

риальных потоков качественно усложняется. Вопросы закупки нового оборудования конкретных типов и моделей и согласования их характеристик со старым, перестройки структуры и ритмов вспомогательных конвейеров, улучшения планировки размещения оборудования невозможно решить без наличия новой номенклатуры перспективного оборудования. Действительно, начиная с 1990 г., в России значительно сократился выпуск металлорежущих станков (МРС) и кузнечно-прессового оборудования (КПО) (рис. 1).

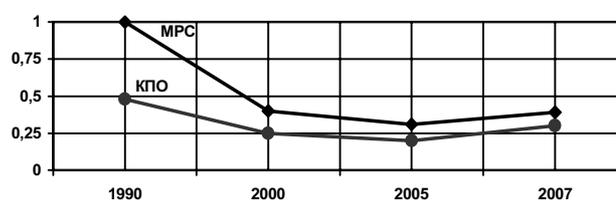


Рис. 1. Выпуск станков в России, относительные единицы

Технология производства изделий, обеспечивающая качественные показатели товарной продукции, формирует функциональные требования к точности, жесткости и вибрации технологического оборудования (ТО). Убедительность и достоверность высказанному положению придают имеющиеся материалы по измерению вибрационных характеристик станков по различным компонентам, а также многочисленные публикации по вибрации металлорежущих станков.

На стадии разработки формирования качества нового ТО начинается с анализа динамики и процессов вибрации станков, обеспечивающего ускоренное продвижение их на рынки сбыта. Существующие основные показатели совершенства конструкций ТО: качество, надежность, производительность, безвредность, удобство работы и обслуживания – затрагивают вопросы вибрации. Значимость и важность проблемы снижения вибрации возрастает при создании станков нового поколения. Успешному решению этой проблемы препятствует недостаточность теоретических и практических разработок по формированию конструктивных параметров станков. Создание ТО с нормированными компонентами вибрации является главной задачей повышения их технического уровня.

Реализация идеи снижения и управления вибрацией станков повышает долю нового ТО, соответствующего мировому уровню на 35...45 %, а в отдельных случаях – до 100 %, по эффективности эквивалентной 15 % стоимости станков. Ввиду сложности кинематических и динамических процессов, происходящих в ТО, системный анализ и имитационное моделирование целесообразно проводить

в сочетании различных элементов и параметров упругой системы станка. Первичная проработка конструкции станка начинается с анализа структурной схемы технологического процесса изготовления детали и изделия на основе типовых конфигураторов (рис. 2).

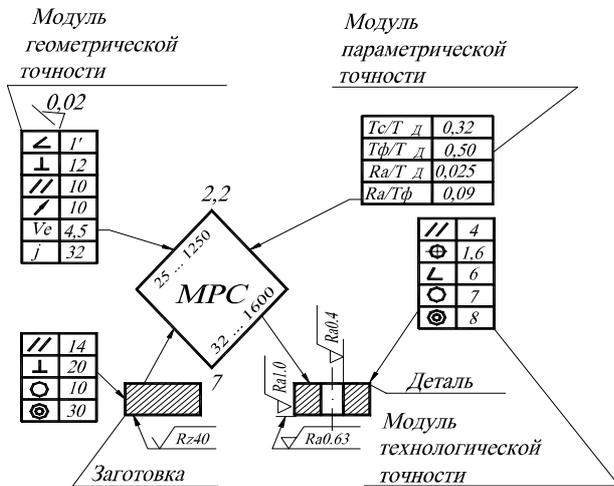


Рис. 2. Станочный конфигуратор для системного анализа технологического процесса

Базовыми показателями качества станка, включенных в станочный конфигуратор, являются численные значения геометрической, технологической, параметрической точ-

ности, а также компоненты вибрации: виброперемещение, виброскорость и виброускорение, показатели назначения. Оценочные показатели металлорежущих станков различных классов точности представлены в параметрической матрице транзитивности (см. таблицу). Данные показатели учитываются при построении станочного конфигуратора [2; 5].

Необходимость и достаточность числа показателей для оценки качества станка, выбираемых по параметрической матрице транзитивности, принимается экспертным решением. При этом не исключается возможность принятия решения о внесении изменений в блочные показатели геометрической, технологической, параметрической точности.

При формировании модуля геометрической точности конфигуратора следует учитывать ужесточение стандартных норм на заводе-изготовителе по действующим стандартам и техническим регламентам. Модуль технологической точности формируется на основе значений параметров действующих стандартов и технических условий на нормы точности для соответствующих групп станков.

Численный анализ размеров и допусков по рабочему чертежу детали по параметрам 2...4 позволяет выбрать необходимый класс точности станка, что способствует увеличению эффективности его использования. Начальное численное моделирование процессов в разрабатываемом или эксплуатируемом станке, подлежащем до-

Исходная параметрическая матрица транзитивности системного анализа технологического оборудования

Дескриптор оценочных показателей	Класс точности металлорежущих станков				
	–	H	P	SP	UP
ISO 230–2	–	H	P	SP	UP
ГОСТ 7599, ГОСТ 8	H	П	В	А	С
+ dt° С участка	10	5	2	1	0,5
$A = T_c / T_d$	0,36	0,32	0,25	0,2	0,16
$R = R_a / T_d$	0,05	0,025	0,0125	0,0063	0,0032
$F = T_\phi / T_d = 1,6^m$	–1	–2	–3	–4	–5
Квантиль $\tau = 1,6^k$	0	–1	–2	–3	–4
Виброскорость V_e , мм/с	7,2	4,5	2,8	1,7	1,1
Точность ДОС: мкм	10	5	2	1	0,5
угловые секунды	3	3	1,5	1	0,3
Установка по уровню: мм/м	0,1	0,04	0,02	0,02	0,01
угловые секунды	20,7	8,3	4,14	4,14	2,07
Доля ТО: без точной механики в точной механике	0,54 0,02	0,26 0,13	0,12 0,28	0,05 0,35	0,03 0,22
Модуль нагрузки	1	0,8	0,63	0,5	0,4
Индекс жесткости	1	1,25	1,56	1,95	2,15
Неравномерность вращения МГД % $кн = 2(w_{max} - w_{min}) / (w_{max} + w_{min})$ механизм подачи	0,14 0,03	0,1 0,02	0,07 0,015	0,06 0,012	0,05 0,01
Перепад скорости при ступенчатом регулировании, %	4,1	2,6	1,2	1,2	1,2
Эксцентриситет центра инерции фундамента со станком и центра массы подошвы фундамента, в сторону уклона, %	5	3	2	2	1
Класс надежности	0	1	2	3	4
Вероятность безотказной работы	0,85	0,9	0,99	0,999	0,9999
Радиальное биение, ряд РФ1, мкм	16	10	6	4	2

Примечание. Применяемые обозначения: T_c – погрешность станка; T_d – наименьший допуск на размер детали; R_a – шероховатость; T_ϕ – допуск формы и расположения поверхностей; V_e – эффективная виброскорость; ДОС – датчик обратной связи; w_{max} , w_{min} – вариация частоты вращения шпинделя, ходового винта.

работке и модернизации, выполняется с использованием регламентированных значений отдельных параметров станка.

Причиной вибрации являются множество факторов [1; 3; 5; 7]:

- конструкторские недоработки: выбор и назначение посадок, центрирование осей вращения роторов, жесткость, спектр частот вращения шпинделя;

- производственные факторы: отклонение размеров от чертежа, режимы термообработки, шероховатость, ошибки сборочных и регулировочных работ, базирование заготовок, качество режущего инструмента, приспособлений, масса заготовок и др.;

- эксплуатационные режимы: вязкость и чистота рабочих жидкостей, износ, техническое состояние ТО, внешние факторы.

Для нормирования вибрации в технических системах используют: виброперемещение, виброскорость, виброускорение с координатной привязкой к характерным точкам и поверхностям станка, а также добротность станка.

Компоненты вибрации являются интегральными показателями энергонасыщенности отдельных механизмов и станка в целом. Количественные характеристики значений геометрической точности станка непосредственно проявляются в измеряемых значениях компонентов вибрации. Вычисленные или измеренные значения этих компонентов при их сопоставлении с нормативными данными позволяют судить о качестве, жесткости, виброустойчивости и точности станка.

Изменение технического состояния станка проявляется в изменении значений измеряемой компоненты вибрации. Компоненты вибрации определяют на начальной стадии проектирования специальными динамическими расчетами, а достоверность результатов расчетов проверяют экспериментальными измерениями после изготовления первого образца станка в период приемосдаточных испытаний.

Полученные значения компонентов вибрации сравнивают с нормативными данными, включая санитарные нормы по ГОСТ 12.1.012–90. Руководствуясь информацией, полученной в процессе разработки станка, построенными математическими моделями компонентов вибрации, конструктор синтезирует характеристики, обеспечивающие достижение заданных показателей качества и виброактивности.

Характерные точки и области измерения вибрации анализируемых станков – это корпусные поверхности в зоне опор шпинделя, поверхности столов, место контакта станины с фундаментом или полом производственного помещения.

Виброперемещение представляет первую компоненту вибрации. Оно является составляющей перемещения, описывающей вибрацию, характеризующую движение точки или системы при поочередном возрастании и убытывании во времени значений параметров [5; 7].

Функциональную зависимость виброперемещения можно записать в виде

$$S = S_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где S_0 – текущее значение перемещения.

Второй компонентой вибрации является виброскорость, в общем случае представляющая первую произ-

водную виброперемещения по времени. В большинстве действующих стандартов, регламентирующих вибрацию двигателей и электрических машин металлорежущих станков и рабочих мест, виброскорость нормирована и представляет основную компоненту вибрационных процессов, отражающую особенности изменения энергии в упругой системе. Использование классической энергетической теории, соотношения потенциальной и кинетической энергии вибрационного процесса для свободных колебаний и принципа Релея позволили получить целевые функции вибрации, описывающие виброскорость V в общем случае:

$$V_i = ds^v / dt = f(\omega_i, x_j^*). \quad (2)$$

Главными аргументами целевой функции для каждого компонента являются многоуровневые частоты ω_i и характерное координатное перемещение x_j^* . За частотные уровни поперечных колебаний приняты пиковые ω_p , эффективные ω_e , минимальные ω_l значения, соответствующие идентифицированным процессам, протекающим в локальном объеме и экстремальных точках станка. Декадные всплески амплитудных значений виброскорости, в частности пиковых значений, характерны как для пусковых и переходных процессов, так и для квазистационарных режимов работы станков, в отличие от традиционных рекомендаций для экспертных оценок конструкций станков.

Из множества частот можно выделить частоты, формируемые и генерируемые непосредственно конструкцией шпинделя и станка.

Частота вибрации по ГОСТ 22061 определяется по функции

$$\omega_p = n \cdot d_i \cdot z / 60 (d_e - d_i), \quad (3)$$

где z – число тел качения в подшипнике; d_e – диаметр беговой дорожки наружного кольца подшипника; d_i – диаметр беговой дорожки внутреннего кольца подшипника.

Частота вибрации, рассчитываемая по функции (3), является наибольшей, так называемой пиковой интегральной частотой вибрации шпиндельной сборки и всей конструкции станка, которая функционально отражается на пиковом значении виброскорости.

Вторая, локальная средняя частота вибрации станка определяется по функции

$$\omega_m = \pi \cdot \Pi / 30, \quad (4)$$

где Π – частота вращения шпинделя, мин⁻¹.

Третья, локальная низшая частота станка ω_l рассчитывается по функции

$$\omega_l = \Pi \cdot \Gamma / 60, \quad (5)$$

где $\Gamma = d_e / d_i$ – коэффициент связи по условию демпфирования, здесь d_e – диаметр беговой дорожки наружного кольца подшипника, d_i – диаметр беговой дорожки внутреннего кольца подшипника качения.

Рассмотренные частоты вибрации позволяют анализировать шпиндельные сборочные единицы (ШСЕ) и станок в характерном евклидовом пространстве, ограниченном контуром станка. Наиболее сложным при системном анализе целевой функции вибрации является количественная оценка и описание характерного координатного перемещения, даже при наличии проектного или ремонтного сборочного чертежа механизма главного

движения станка. Проработку конструкции ШСЕ и станка начинают с составления общей матрицы согласия.

Функция перемещения представлена в виде

$$f(x) = \begin{cases} f(P\delta) & \text{если } x \in D, \\ f(IT) & \text{если } x \in D, \\ f(it) & \text{если } x \in D, \\ f(e) & \text{если } x \in D, \\ f(y) & \text{если } x \in D, \\ \text{не определена} & \text{если } x \in D. \end{cases} \quad (6)$$

Функция перемещения (6) состоит из основных параметров станка, отвечающих допустимому решению и представляющих:

- радиальное биение шпинделя $f(P\delta)$;
- допуски, охватывающие элементы, форму и расположение отверстий характерной контактной пары $f(IT)$;
- соответствующие допуски, охватывающие элементы, форму и расположение поверхностей характерных контактных пар вала $f(it)$;
- конструктивный и технологический дисбаланс ШСЕ $f(e)$ по ГОСТ 22061;
- статический прогиб шпинделя на участках, обуславливающих формирование размера изделия $f(y)$;
- внешние и внутренние факторы, не описанные соответствующими математическими моделями.

Функция радиального биения представлена в виде

$$P_{\delta 1} = 3 \cdot [B_1 / j^{0.5} + a (B_1 / j^{0.5} + B_2 / i^{0.5}) / L] / 2Ж, \quad (7)$$

где $P_{\delta 1}$ – радиальное биение консоли шпинделя; B_1, B_2 – радиальное биение подшипников передней, задней опоры; j, i – число подшипников соответственно в передней и задней опорах; a – длина консоли левого или правого участка; L – расстояние между опорами шпинделя по Р 50-83–88; $Ж = D / d$ – коэффициент связи по радиальному биению опор, здесь D, d – соответственно наружный и внутренний диаметры подшипника в передней или задней опорах шпинделя.

При использовании в компоновке подшипников разного диаметра коэффициент связи определяется по большему габариту и номеру подшипника, а при использовании подшипников разного класса точности по ГОСТ 520–89 выбирается подшипник с низким классом точности. Во всех случаях при анализе конструкций за правую или переднюю опору принята опора, расположенная у режущего инструмента.

Радиальное биение межопорного участка шпинделя $P_{\delta 2}$ определяется по функции

$$R_{\delta 2} = (3 + IT) / 2Ж, \quad (8)$$

где 3 – зазор или натяг посадки подшипника для ШСЕ; IT – допуск посадочного размера корпуса шпинделя.

При анализе виброактивности ШСЕ и станка значение радиального биения рассчитывается, как среднее арифметическое от функций (7) и (8).

Трудности выявления контактных пар преодолеваются, если начать анализ с двух парных точек посадочных диаметров внутреннего и наружного колец, принадлежащих подшипнику качения. Дисбаланс учитывается по эксцентриситету геометрической оси вращения шпинделя с осью, проходящей через центры тяжести вращающихся масс элементов конструкции ШСЕ.

Значение эксцентриситета определяется по зависимости

$$e = (e \cdot w) / w, \quad (9)$$

где $(e \cdot w)$ – скоростной параметр, выбираемый по ГОСТ 22061.

Для станка нормального класса точности класс точности балансировки принимается не более 4, а для станков повышенного класса точности – не более 3. Для станков прецизионного класса рекомендуемыми классами точности балансировки являются классы 1 и 2 по ГОСТ 22061. В практике системного анализа ШСЕ значение эксцентриситета берется как половина от значения, вычисленного по функции (9).

Значение прогиба консоли шпинделя вычисляется по функции

$$y_1 = 10^3 B_i \cdot a^3 / 3E \cdot I \cdot Ц, \quad (10)$$

где $B_i = m \cdot g$ – приведенный параметр консоли шпинделя левой или правой части; a – длина соответствующей консоли шпинделя; E – модуль упругости материала шпинделя; I – момент инерции сечения соответствующей консоли шпинделя; $Ц = L / 2 d_e$ – коэффициент связи по диаметру подшипника; здесь d_e – диаметр беговой дорожки наружного кольца подшипника.

Прогиб в пролете шпинделя определяется по формуле

$$y_2 = 10^3 B_2 \cdot L^3 / 48E \cdot I \cdot Ц, \quad (11)$$

где B_2 – вес пролета шпинделя с вращающимися элементами; L – расстояние между опорами шпинделя по Р 50-83–88.

Кроме линейных размеров, вращающиеся массы существенно влияют и на формирование вибрационных процессов в ШСЕ и станке. В общем случае характерное координатное перемещение для новых, эксплуатируемых не более 18 месяцев станков следует определять как среднее арифметическое перемещений, вычисляемых по математическим моделям. А для станков, эксплуатируемых после среднего ремонта характерное координатное перемещение высчитывается, как сумма функциональных единичных параметров. Сложность определения координат функциональных точек заключается в раскрытии конструкции механизмов станков, не предусматривающих установки штатной диагностической аппаратуры. Определение пиковой, максимальной виброскорости в характерных точках станка выполняется по следующим функциям в экстремальной интегральной точке, принадлежащей механизму главного движения в области опор качения на поверхности корпуса ШСЕ:

$$V_{sp} = w_p \cdot x, \quad (12)$$

где V_{sp} – виброскорость в энергонасыщенной интегральной точке механизма главного движения.

В локальной средней точке (ЛСТ), принадлежащей механизму базирования, направляющей линейке,

$$V_{mp} = w_p \cdot k_{cm} \cdot x, \quad (13)$$

где V_{mp} – виброскорость в энергонасыщенной точке механизма базирования, направляющей линейки; $k_{cm} = w_m / w_s$ – коэффициент связи по координатному перемещению в ЛСТ.

В локальной нижней точке (ЛНТ), принадлежащей несущей системе станка, опорным поверхностям станка, зеркалу фундамента,

$$V_{lp} = w_p \cdot k_{cl} \cdot x, \quad (14)$$

где V_{lp} – виброскорость в локальной низшей точке, принадлежащей как несущей системе, так и фундаменту; $k_{cl} = w_l / w_s$ – коэффициент связи по координатному перемещению в ЛНТ.

Виброскорость является базовым компонентом, характеризующим вибрацию и динамику станка. Третьим компонентом, оценивающей вибрацию станка, является виброускорение, представляющее производную виброскорости по времени. Из определения в общем случае следует

$$a_i = d^2 \cdot sv / dt^2 = f(w_i^2, x_j^*) = dV / dt = -S_o \cdot w^2 \cdot \sin(w \cdot t + \varphi). \quad (15)$$

С учетом выполненных выкладок по виброскорости. исходные целевые функции вибрации по виброускорению имеют следующий вид

– виброускорение в экстремальной интегральной точке, принадлежащей механизму главного движения в области опор качения на поверхности корпуса ШСЕ,

$$a_{sp} = w_s \cdot V_{sp}; \quad (16)$$

– виброускорение в локальной средней точке, принадлежащей поверхностям механизма базирования, направляющей линейки, механизма подачи,

$$a_{mp} = w_m \cdot V_{mp}; \quad (17)$$

– виброускорение в локальной низшей точке, принадлежащей несущей системе станка, опорным поверхностям станка, зеркалу фундамента,

$$a_{lp} = w_l \cdot V_{lp}. \quad (18)$$

Наибольшее влияние на изменение виброускорения оказывает частота вращения шпинделя. По величине виброускорения можно судить о дополнительных динамических силах, действующих в конструкции ШСЕ и на опоры шпинделя, а также о соотношении статических и динамических нагрузок в подшипниках шпинделя. При значении виброускорения больше стандартного значения в опорах шпинделя возникают значительные динамические нагрузки, превышающие статические. В этом случае в конструкции ШСЕ и станка следует дополнительно проработать посадки, радиальные и аксиальные зазоры в подшипниках, установку динамических гасителей. Если значение виброускорения меньше стандартного значения, то в подшипниках ШСЕ динамическая нагрузка не превышает статическую нагрузку от веса сборки шпинделя с режущим инструментом и элементом привода.

В теории колебаний и вибрации показателем качества упругих механических систем является добротность. Добротность Q_v раскрывает суть внутренних динамических процессов через относительные показатели изменения компонент вибрации, а также позволяет понять процессы стабилизации отдельных видов движений механизмов станка, подойти к сложному анализу динамики вращения шпинделя. Последнее относится к лагранжевому движению нутации собственной оси шпинделя и пуансовому азимутальному движению оси шпинделя в зоне резания, проявляющихся в виде следа на замкнутой сфере с траекториями в форме синусоиды, острия и петли. Имитационное моделирование, анализ осциллограмм работы станка при начальных экспериментах позволили и получить зависимости для определения

добротности на принципиально новой основе – по функции виброскорости в виде структуры функций:

$$O_y = \begin{cases} B_p / b_p & \text{если } B_p < B_{p_{\max}} \text{ и } b_p < b_{p_{\max}}, \\ B_e / b_e & \text{если } B_e < B_{e_{\max}} \text{ и } b_e < b_{e_{\max}}, \\ B_m / b_m & \text{если } B_m < B_{m_{\max}} \text{ и } b_m < b_{m_{\max}}, \\ B_l / b_l & \text{если } B_l < B_{l_{\max}} \text{ и } b_l < b_{l_{\max}}, \end{cases} \quad (19)$$

где $B_p, b_p, B_e, b_e, B_m, b_m$ – виброскорость и ее вариация соответственно для пикового, среднего и минимального значений.

Максимальные значения приняты в эргонасыщенной точке ШСЕ.

Вариация виброскорости в станке, как и другие компоненты вибрации, происходит вследствие ряда конструктивных причин, описываемых целевой функцией вибрации, а также реологическими свойствами упругой системы станка, содержащего, так называемые тела Гука и Ньютона, которые в конструкции станка с последовательным соединением выступают в форме тела Максвелла, с параллельным соединением – в форме тела Кельвина–Фойхгга, с комбинированным соединением – в форме тела Бюргерса–Френкеля.

Для качественной и количественной оценки конструкций новых станков имитационное моделирование динамики фрезерных станков проводилось в математическом пакете Mathcad 8 Pro с использованием специальных прикладных программ «Вибро» и «Аксель».

Произведя первичные преобразования общего уравнения вынужденных колебаний (20), записанного с коэффициентом сопротивления α [1; 2; 5]:

$$m \cdot y'' + \alpha \cdot y' + c \cdot y = Q \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (20)$$

получаем дифференциальное уравнение вынужденных колебаний (21) для моделирования виброактивности конструкций механизма главного движения и фрезерного станка:

$$y_i'' + 2 \cdot h \cdot y_i' + p_i^2 \cdot y_i = H \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (21)$$

где $h = q / 2m$ – коэффициент демпфирования станочной системы, c^{-1} ; q – коэффициент сопротивления, внутреннее трение в материале, $H \cdot c / m$; m_i – приведенная масса системы, кг; $p_i = c / m$ – частота собственных колебаний системы, c^{-1} ; y_i – характерное функциональное перемещение, мкм; H – приведенная нагрузка, вызывающая вибрацию станочной системы, Н; ω – вынужденная частота процесса работы станка, c^{-1} ; t – функциональное время, с.

Численные значения угловых колебаний шпинделя на участке крепления режущего инструмента показаны на рис. 3.

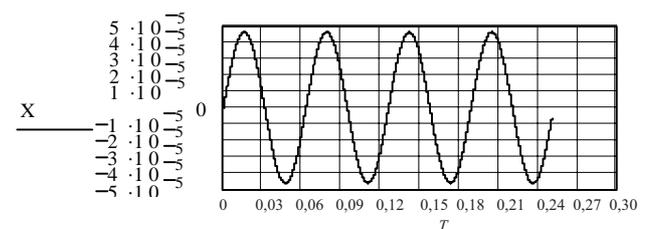


Рис. 3. Угловые колебания шпинделя, рад / м

Результат моделирования поперечных колебаний шпинделя по компоненте виброперемещения с физическим отображением параметра геометрической точности

станка, в частности радиального биения шпинделя, представлен на рис. 4. Амплитуда поперечных колебаний, сопоставимая с радиальным биением шпинделя, позволяет оценить уровень точности и конкурентоспособности станка на стадии проектирования. Управляя формированием линейных размеров шпиндельной сборки механизма главного движения и роторов механизма подачи, можно создавать конструкции с новыми свойствами заданных движущих масс. Используя новую технологию проектирования на базе математического моделирования, можно значительно ускорить создание отечественных станков нового поколения.

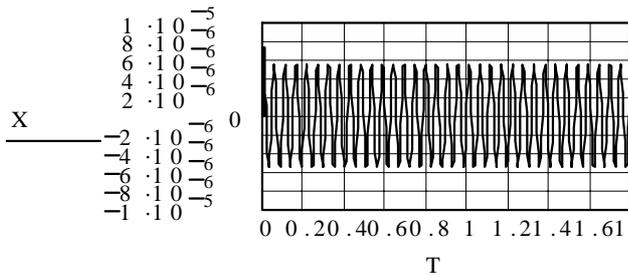


Рис. 4. Поперечные колебания станка

Переходный процесс разгона шпинделя (рис. 5) показывает динамику изменения амплитуды колебания и стабилизацию угловой скорости шпинделя.

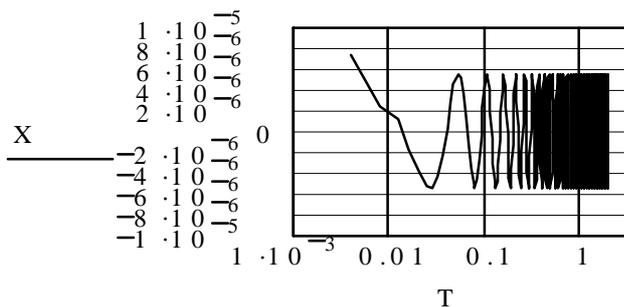


Рис. 5. Переходный процесс (разгон шпинделя)

Оценка принимаемых технических решений на стадии проектирования новых станков на основе использования технологии системного моделирования ускоряет запуск в производство конкурентоспособной станочной

продукции. Первичные исследования подтверждают возможность управления компонентами вибрации при разработке нового технологического оборудования.

Современное состояние теории машин позволяет активно воздействовать на процесс проектирования и конструирования при создании конкурентоспособной продукции станкостроения.

Используя системный анализ и теорию малых колебаний, можно разрабатывать технические условия на основе синтеза основных параметров и характеристик как станка, так и детали, товарной продукции. Синтез обеспечивает оптимизацию линейно-массовых характеристик объекта разработки. Выходными параметрами, пригодными для системного анализа, являются компоненты вибрации: виброскорость, виброускорение и виброперемещение, которые анализируются по исходной конструкторской документации, состоящей из чертежей общего вида, проектных, рабочих, ремонтных сборочных чертежей.

Библиографический список

1. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. М.: Высш. шк., 1980. 408 с.
2. Филиппов, Ю. А. Анализ технических возможностей оборудования при разработке технологических процессов / Ю. А. Филиппов, Л. В. Ручкин, В. Д. Утенков, Н. А. Амельченко // Инструмент Сибири. 2002. № 5. С. 12–14.
3. Гусев, А. С. Оценка конструкций при случайных возмущениях / А. С. Гусев, В. А. Светлицкий. М.: Машиностроение, 1984. 240 с.
4. ГОСТ 12.1.012–90 ССБТ. Вибрационная безопасность. М.: Стандарты, 1990. 45 с. Введен с 1.07.91.
5. Кедров, С. С. Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
6. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем. Т. 2. Ч. 1. Расчет и конструирование узлов и элементов станков / А. С. Проников и др. М.: Машиностроение, 1995. 371 с.
7. Филиппов, Ю. А. Формирование компонент вибрации при проектировании дереворежущих станков / Ю. А. Филиппов // Изв. вузов. Сер. «Машиностроение». 2002. № 2–3. С. 92–99.

A. V. Nikitin, E. V. Ramenskaja, E. V. Burgardt, Ju. A. Filippov

THE MACHINE TOOLS QUALITY ESTIMATION TECHNOLOGY

The machine tools equipment condition questions, vibrating processes control problems was considered on the basis of imitating modeling with purpose of creation of new designs of machine tools with increased precision and competitiveness.

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ТЕХНИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Рассматриваются закономерности процесса обеспечения технической совместимости во взаимосвязи с общими законами развития техники.

Согласованность составных частей техники, явившись основным условием появления первой в мире машины, на протяжении многих веков обеспечивалась интуитивно, методом проб и ошибок. И лишь с начала XX в. по мере ускорения технического прогресса и усложнения техники эта задача стала постепенно выходить из-под власти специалистов-практиков и требовать к себе внимания инженеров и ученых.

Середина XX в. ознаменовалась не только слиянием научного и технического прогресса в единый научно-технический прогресс, но и превращением задачи обеспечения согласованности техники, получившей название «совместимость» (*compatibility*), в сложную научно-техническую проблему. От решения этой проблемы зависел успех развития радиоэлектронных средств (РЭС), ракетно-космической техники (РКТ), атомной энергетики, электронно-вычислительных машин (ЭВМ), систем «человек–машина» (СЧМ) и других областей современной техники.

Вопросами обеспечения совместимости техники стали заниматься инженеры, научные сотрудники и даже известные ученые, например В. М. Глушков [1]. Целевые исследования охватили всю технику от триботехнических до кибернетических систем [1; 2]. Исследовались и частные виды совместимости применительно, например, к автоматизированным системам управления (АСУ) и ЭВМ: конструктивная, технологическая, эксплуатационная, механическая, тепловая, электрическая, электромагнитная, размерная и др. [1; 4; 5]. Всего в поле зрения исследователей находятся более 40 видов совместимости.

Выпуск соответствующих государственных стандартов [5] положил начало наведению порядка в терминологии. В общетехническом отношении трудно переоценить роль общегосударственного стандарта ГОСТ 30708–2002 [3], установившего понятие «техническая совместимость» (ТС) и терминологию по ряду ее видов. Заметное развитие получает теоретизация знаний в области ТС, подобно тому, как это происходило с теорией надежности, теорией управления и другими общетехническими дисциплинами.

К основной причине изменения отношения специалистов к проблеме научного обеспечения ТС следует отнести все более осмысленное понимание того, что совместимость техники – основа ее качества, что без теоретизации этого знания не может быть реализован его полный потенциал [7; 8].

Для формирования общетеоретического знания значительный интерес представляет вопрос о проявляемых закономерностях ТС. Цель данной статьи – представить на обсуждение научной общественности авторскую версию общих и частных закономерностей процесса обеспечения совместимости современной техники.

Поскольку ТС свойственна всей технике, т. е. имеет глобальный характер, то можно сделать вполне закономерный вывод о проявлении в ней основных законов ди-

алектики. Так, уровень совместимости любого технического устройства (ТУ) определяется соотношением уровней взаимодействия $\mathcal{A}(\mathcal{T})$ – акта штатного функционирования его элементов, и взаимовоздействия $\mathcal{A}(\mathcal{T})$ – акта их вредного взаимовлияния [8]. В понятиях первого закона диалектики величины $\mathcal{A}(\mathcal{T})$ и $\mathcal{A}(\mathcal{T})$ являются противоположностями, которые в зависимости от этапа жизненного цикла (ЭЖЦ) ТУ имеют различные закономерные отношения:

$$\mathcal{A}(\mathcal{T}) \ll \mathcal{A}(\mathcal{T}) \quad (1);$$

$$\mathcal{A}(\mathcal{T}) < \mathcal{A}(\mathcal{T}) \quad (2);$$

$$\mathcal{A}(\mathcal{T}) = \mathcal{A}(\mathcal{T}) \quad (3);$$

$$\mathcal{A}(\mathcal{T}) > \mathcal{A}(\mathcal{T}) \quad (4);$$

$$\mathcal{A}(\mathcal{T}) \gg \mathcal{A}(\mathcal{T}) \quad (5).$$

Отношение (1) может иметь место, например, перед пуско-наладочными работами, когда элементы ТУ не настроены, взаимонеподогнаны по своим входным и выходным параметрам и, следовательно, находятся в наибольшем противоречии. При настройке ТУ отношения $\mathcal{A}(\mathcal{T})$ и $\mathcal{A}(\mathcal{T})$ постепенно проходят значения (2)...(4) и даже могут получить значение (5), хотя для большинства видов ТУ последнее наступает только после периода приработки элементов, нередко в облегченных (щадящих) режимах. Такая процедура хорошо знакома на примере приработки узлов двигателей автомобилей.

По мере выработки ресурса отношения величины $\mathcal{A}(\mathcal{T})$ и $\mathcal{A}(\mathcal{T})$ меняется в обратном порядке. В конце концов наступает момент (2) или, еще хуже, (1), когда состояние ТУ признается недопустимым и оно должно быть списано или отдано на капитальный ремонт.

В закономерностях обеспечения ТС исходя из срока морального старения дело обстоит сложнее, так как при этом необходимо учитывать психологию отношения пользователей к интересующим их ТУ, назначение ТУ (бытовое, гражданское или оборонное), условия рынка, экономическое положение создателей ТУ и многие другие факторы. За диалектические противоположности здесь могут быть приняты польза от реализации (эксплуатации) ТУ и вред от его морального устаревания.

Закономерность технической совместимости, связанная с проявлением второго закона диалектики (взаимоперехода количественных и качественных изменений), заключается в обеспечении совместимости технических новаций (ТН) с унифицированными элементами (УЭ) ТУ. При этом можно констатировать закономерное стремление разработчиков использовать в технических устройствах только такие ТН, которые достаточно совместимы с УЭ и позволяют достичь наибольшую эффективность при применении ТУ.

Изучение механизма воздействия третьего закона диалектики (отрицание отрицания) позволило установить еще одну общую закономерность ТС, заключающуюся в обеспечении достаточной совместимости ранее отвергнутых

технических решений (ТР) с УЭ, также нередко позволяющей получить более качественные ТУ. Примерами, подтверждающими эту закономерность, являются возврат к широкому использованию на космических аппаратах (КА) солнечных батарей (СБ) вместо изотопных генераторов, применение электронных ламп вместо полупроводников и др.

Установлена еще одна закономерность ТС, выражающаяся в первичности совместимости и вторичности качества техники: совместимость техники является исходным моментом формирования ее качества в процессе разработки $W(A)$. В символическом виде эту закономерность можно представить как

$$W(A) = D(C_1) \bar{\Lambda} D(S) \bar{\Lambda} [D(C_2) \wedge D(Q)], \quad (6)$$

где $D(C_1)$ – обеспечение совместимости приоритетного характера; $D(S)$ – выполнение синтеза изделия; $D(C_2)$ – обеспечение совместимости неприоритетного характера; $D(Q)$ – обеспечение качества изделия; $\bar{\Lambda}, \wedge$ – знаки направленной и ненаправленной конъюнкции, соответственно.

Разработчики техники хорошо знают, что в ходе проектно-конструкторской деятельности прежде всего прорабатываются принципиальные вопросы размерной совместимости, совместимости материалов конструкции, совместимости (взаимной и с материалами конструкции) компонентов топлива (для энергетических установок), совместимости изделия и его элементов с окружающей средой (например, по воздействию климатических факторов), совместимости тепловыделяющих и теплочувствительных элементов, экологической совместимости и т. д. Если при разработке какой-либо машины (или любого другого ТУ) в вопросах обеспечения совместимости допущена серьезная ошибка, то о качестве и эффективности этой машины говорить не приходится. При этом могут свестись на нет все достоинства даже самого совершенного физического принципа действия (ФПД), заложенного в данную машину. И наоборот, при удачном обеспечении ТС можно получить конкурентоспособный образец машины и при не самом совершенном ФПД.

При разработке любого изделия (процесса) на уровне изобретения необходимо прежде всего, по меткому выражению Г. С. Альтшуллера [9], совместить несовместимое. Только после решения этой задачи выполняются все остальные проектно-конструкторские задачи, и в результате появляется принципиально новое изделие (процесс), обладающее ранее недостижимым качеством.

В ходе проведенных исследований установлено семь частных закономерностей ТС, проявляемых в процессе совершенствования современной техники. Дело в том, что каждое новое поколение изделий одного и того же функционального назначения появляется, как правило, в результате реализации более совершенных вариантов и видов совместимости. При этом интерес представляют три вопроса: 1) физическая суть нового (ФСН), путь его достижения; 2) технический эффект нового (ТЭН), новое качество; 3) экономическая целесообразность (ЭЦ) практической реализации нового.

Закономерность \mathcal{Z}_1 . Переход от менее совершенного к более совершенному варианту непосредственной совместимости (НС).

ФСН: изменение расстояния между взаимодействующими устройствами; использование более помехоустой-

чивых комплектующих элементов; применение более качественной смазки трущихся деталей изделия; введение облегченных режимов работы изделия; построение изделия на новом ФПД и др. ТЭН: повышение мощности, скорости, производительности; увеличение ресурса и т. п. ЭЦ практической реализации оценивается по отношению

$$\sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i > \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i^0, \quad (7)$$

где \mathcal{E}_i – положительный эффект (доходы) от i -й инновации; \mathcal{E}_i^0 – затраты на i -ю инновацию.

Закономерность \mathcal{Z}_2 . Переход от непосредственной к опосредованной совместимости (ОС).

ФСН: установка экранов и (или) переходных устройств по причине введения помехочувствительных (например, в микроэлектронном исполнении) блоков, изменения структуры, использования нового ФПД изделия и т. д. ТЭН и ЭЦ такие же, как и у \mathcal{Z}_1 .

Закономерность \mathcal{Z}_3 . Переход от опосредованной к непосредственной совместимости.

ФСН: упраздняются защитные экраны и (или) переходные устройства по причине более удачной компоновки, применения помехоустойчивых элементов, изменения структуры, введения нового ФПД и т. п. ТЭН: снижение веса и габаритов изделия, улучшение его выходных параметров. ЭЦ аналогична ЭЦ для \mathcal{Z}_2 .

Закономерность \mathcal{Z}_4 . Переход от менее совершенных к более совершенным вариантам ОС.

ФСН: применение более совершенных материалов и элементов для экранов и переходных устройств, позволяющих изготавливать последние более качественно; выполнение более удачной компоновки, позволяющей, например, использовать вместо экранов другие устройства изделия и др. ТЭН аналогичен ТЭН для \mathcal{Z}_3 . ЭЦ аналогична ЭЦ для \mathcal{Z}_1 .

Закономерности $\mathcal{Z}_1 \dots \mathcal{Z}_4$ являются полным набором возможных переходов НС и ОС. Следующие закономерности $\mathcal{Z}_5 \dots \mathcal{Z}_7$ представляют собой полный набор вариантов изменения количественного состава частных видов ТС.

Закономерность \mathcal{Z}_5 . Переход к сокращенному составу частных видов ТС.

ФСН: разработка изделия на новом ФПД с меньшим количеством физико-технических эффектов (ФТЭ) и, следовательно, меньшим повидовым составом ТС. ТЭН может быть самым разнообразным. ЭЦ определяется соотношениями

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^l \mathcal{E}_j^{[H]} &\geq \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_i^{[N]} \\ \sum_{j=1}^l \mathcal{E}_j^{[N]} &\leq \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_i^{[H]} \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где $\mathcal{E}_j^{[H]}, \mathcal{E}_i^{[N]}$ – эффекты (доходы) от нового и предыдущего изделий соответственно; $\mathcal{E}_j^{[N]}, \mathcal{E}_i^{[H]}$ – частные затраты на новое и предыдущее изделия соответственно.

Для изделий коммерческого назначения соотношения (8) обязательны, так как они гарантируют экономическое благополучие как создателей, так и заказчиков изделий. Для изделий оборонного назначения могут быть приняты более худшие варианты соотношений (8), поскольку здесь ситуация может носить вынужденный характер по принципу «оборонную технику любой ценой».

Закономерность \mathcal{Z}_6 . Переход к расширенному видовому составу совместимости.

ФСН: разработка изделия на новом ФПД, имеющем большее количество ФТЭ, чем ФПД предыдущего изделия, а следовательно, и больший видовой состав ТС. ТЭН может быть самым разнообразным. ЭЦ аналогична ЭЦ для \mathcal{E}_5 .

Закономерность \mathcal{E}_7 . Переход к измененному видовому составу ТС при том же его количестве.

ФСН: разработка изделия на новом ФПД, имеющем то же количество ФТЭ, что и ФПД предыдущего изделия, но с частичной заменой видовой состава ТС. ТЭН может быть любой. ЭЦ аналогична ЭЦ для \mathcal{E}_3 и \mathcal{E}_6 . Следует заметить, что полную замену видовой состава ТС при этом осуществить в принципе невозможно. Например, конструктивная совместимость как вид ТС имеет место в любом ТУ, поэтому может изменяться лишь уровень ее совершенства.

Совместимость техники, несмотря на самые совершенные методы ее обеспечения, склонна с течением времени к деградации и потере из-за износа, старения, коррозии и других деградирующих процессов, происходящих в конструкционных материалах и комплектующих элементах ТУ.

Потеря совместимости изделия – случайное явление и, разумеется, протекает по законам случайных процессов, фундаментально исследованным в теории вероятностей. Эти законы достаточно освоены прикладными техническими науками, разработки которых во многом оказываются приемлемыми и для теории ТС (ТТС). Это прежде всего относится к работам по теории надежности, среди которых наибольшее внимание по рассматриваемым вопросам заслуживают работы [13–16]. Ряд положений этих работ можно принять для интерпретации процесса потери совместимости. Таким положением является, например, графоаналитическая модель формирования постепенных отказов. Представленная схема (рис. 1) иллюстрирует процесс формирования отказа изделия при постепенной потере его совместимости. При этом автором рассмотрен наиболее характерный случай, когда отказ возникает по достижении выходным параметром Π своего минимального предельно-допустимого значения Π_{\min} .

При толковании закона распределения совместимости $f_c(t)$ во внимание принимается прежде всего рассеивание выходного параметра $f(\Pi_0)$ относительно своего математического ожидания Π_0 , связанное с нестабильностью на-

чального режима работы из-за влияния факторов начальной несовместимости (1), (2), исчезающих по мере приработки элементов изделия (3)...(5).

Через некоторый промежуток времени T_n , также являющийся случайной величиной, характеризующейся зависимостью $f(T_n)$, начинается снижение величины выходного параметра Π , вызванное медленно протекающими факторами, например износом, старением и т. д. Процесс снижения величины параметра Π со скоростью x_n также является случайным, характеризуется зависимостью $f(x_n)$ и связан с потерей совместимости отдельных элементов изделия со скоростями $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_k$ соответственно (k – количество элементов изделия).

Все указанные явления совокупно формируют закон распределения $f(\Pi, t)$, определяющий вероятность падения величины выходного параметра до предельно-допустимого значения Π_{\min} , т. е. вероятность отказа $Q(t)$.

Рассмотренная схема имеет обобщенный характер, так что в частных случаях некоторые представленные в ней процессы могут иметь несколько иное толкование или вообще отсутствовать. Так, если при эксплуатации для металлообрабатывающих станков процесс начального рассеивания выходного параметра весьма характерен, то для КА он отсутствует, так как этап приработки бортовой аппаратуры осуществляется при заводских испытаниях изделия.

Если основную процессуальную роль отдать функции $f(T_n)$, то будет получена модель внезапного отказа по причине непредвиденной потери совместимости. Если $T_n = 0$, то имеет место модель возникновения постепенного параметрического отказа при постепенной потере совместимости без начального приработочного периода (что как раз и характерно для КА). Если по достижении предельно-допустимого минимального значения параметра Π_{\min} затем наблюдается резкое падение Π_{\min} вплоть до нуля, то последнее обычно означает отказ функционирования изделия по причине полной потери совместимости какого-то элемента. Означает ли это полную потерю совместимости изделия? Все зависит от многих обстоятельств: какова структура изделия; были ли ранее такие отказы этого изделия; в чем их причина; каков уровень совершенства комплектующих элементов изделия и т. д.

Каковы законы распределения вероятности потери совместимости $Q(C)$? Здесь тоже применимы соответствующие положения теории надежности. Нормальное распределение используется для описания процессов потери совместимости по причинам износа, старения, т. е. процессов постепенной потери совместимости. Для таких процессов пригодны также распределение Вейбулла-Гнеденко, гамма-распределение и распределение Рэлея. Экспоненциальное распределение применимо для описания процессов внезапной потери совместимости.

Кроме того, имеет место общий для техники закон потери совместимости, который автором назван законом монизма (греч. *monos* – один). Он состоит в том, что причиной отказа любого изделия является потеря совместимости какого-то одного его элемента. Проявление такого монизма имеет физическое и математическое толкования. Процессы физической деградации (старения, износа и т. д.) элементов, приводящие их к потере совместимости, трудно прогнозируются в пространстве и во вре-

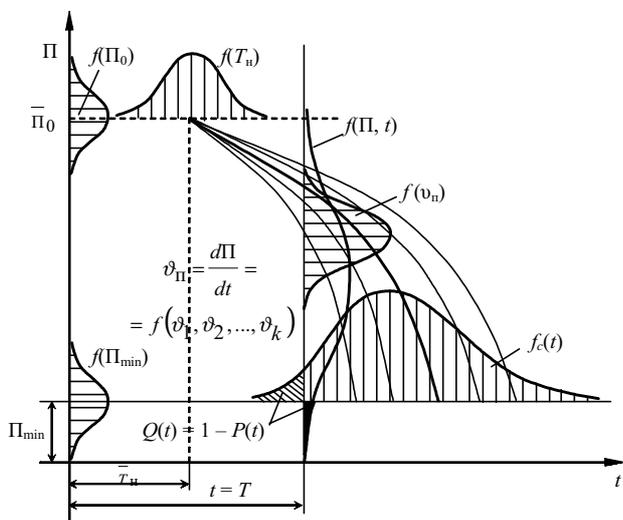


Рис. 1. Схема формирования отказа при постепенной потере совместимости изделия

мени. Принимая факты потери совместимости отдельных элементов как независимые события, можно представить вероятность потери совместимости одновременно двумя (k -м и r -м) элементами изделия:

$$Q(c_k, c_r) = Q(c_k) \cdot Q(c_r), \quad (9)$$

где $Q(c_k) \cdot Q(c_r)$ – вероятности потери совместимости k -м и r -м элементами соответственно.

Для современных изделий типа КА вероятность полной потери совместимости (отказа) комплектующих элементов (блоков, устройств, узлов) лежит в пределах

$$Q(C_i) = 1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-4}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (10)$$

где N – количество элементов изделия.

Следовательно, вероятность (9) очень мала и практически может быть принята равной нулю.

Выше была показана связь процесса обеспечения ТС с техническим прогрессом. Это обстоятельство также дает основание полагать наличие связи между закономерностями обеспечения ТС и закономерностями развития техники. Так, рассматривая последние по известным работам [10...12], можно констатировать, что закономерность \mathcal{Z}_2 связана с закономерностью дифференциации техники, а закономерность \mathcal{Z}_3 – с закономерностью интеграции техники [10]. Все закономерности $\mathcal{Z}_1 - \mathcal{Z}_7$ обоснованно можно отнести к факту проявления закона эволюционного развития техники [12].

Связь закономерностей ТС с закономерностями технического прогресса, представленными в работе [11], имеет более сложный характер, и ее необходимо рассматривать отдельно. В этой работе установлено, что критерии развития техники изменяются, как правило, в соответствии с функцией

$$K = \frac{\mathcal{L}}{\left(a + e^{b\beta t} \right)}, \quad (11)$$

где \mathcal{L}, a, b, β – коэффициенты, определяемые статистическим путем; t – время.

Если коэффициенты \mathcal{L}, a, b, β удовлетворяют одному из следующих трех условий:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L} > 0, \quad b > 0, \quad \beta > 0, \quad a > -1, \\ e^b(b-1) - a(b+1) > 0, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L} < 0, \quad b < 0, \quad \beta < 0, \quad a > 0, \\ e^{-|b|}(-|b|-1) - a(-|b|+1) < 0, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L} < 0, \quad b < 0, \quad \beta > 0, \quad a < -1, \\ e^{-|b|}(|b|+1) - a(1-|b|) > 0, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

то функция (11) называется S -функцией.

Для многих представителей современной техники, в том числе КА, можно выделить три стадии развития (рис. 2) со следующими принятыми обозначениями: 1, 2, 3 – линии активных участков 1-й, 2-й и 3-й S -функций развития соответственно; 4 – линия, огибающая активные участки S -функций; 5 – предполагаемое (прогнозируемое) развитие по 4-й S -функции; 6 – медиана семейства S -функций, сама являющаяся S -функцией; A, C, E – возможные точки межстадийного перехода без потери темпа развития; B, D – действительные, хронологические точки межстадийного перехода развития; $t_1 \dots t_5$ – хронологические моменты времени, соответствующие точкам

$A, B, C, D, E; K_1 \dots K_5$ – уровни критериев развития, соответствующие точкам A, B, C, D, E .

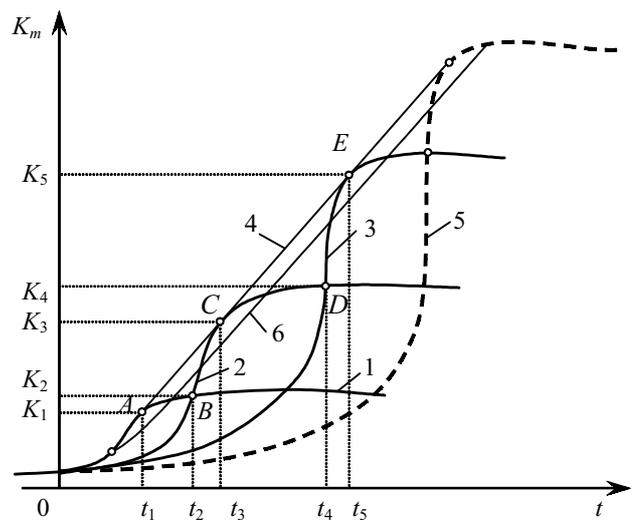


Рис. 2. Трехстадийный процесс развития техники

Для КА связи (КАС) разработки НПО ПМ можно, например, выделить три стадии развития по двум определяющим факторам:

- 1) конструктивному построению гермоконтейнера (ГК);
- 2) диапазону рабочих частот.

Исходя из первого фактора, первую стадию (S_1 -функция) представляют ГК, выполненные совместно с солнечной батареей (СБ) единой конструкцией (СБ не ориентировалась на Солнце). На второй стадии (S_2 -функция) СБ была отделена от ГК и ориентирована на Солнце. Отличительной особенностью третьей стадии (S_3 -функция) является конструктивное разделение ГК на ГК для модуля служебных систем (МСС) и ГК для модуля полезной нагрузки (МПН).

Исходя из второго фактора, первую стадию развития (S_1 -функция) представляют КАС с дециметровым диапазоном радиочастоты (РЧ), вторую стадию (S_2 -функция) – с сантиметровым диапазоном РЧ и третью стадию (S_3 -функция) – с миллиметровым диапазоном РЧ.

При такой классификации довольно четко просматривается следующая стадия развития КАС (4-я S -функция): это бесконтейнерный вариант конструкции и оптический диапазон РЧ. Такие работы уже ведутся, хотя здесь есть серьезные трудности.

Процесс развития техники, представленный диаграммой (см. рис. 2), имеет ряд характерных моментов и обстоятельств. Так, переход от S_1 -функции к S_2 -функции (точка B) является более прогрессивным, нежели переход от S_2 -функции к S_3 -функции (точка D). Это объясняется тем, что точка D расположена на участке насыщения S_2 -функции, где темп развития ТУ упал до нуля, т. е. оно морально устарело. Если такое ТУ имеет коммерческое предназначение, то предприятию, его выпускающему, реально угрожает экономическая стагнация. Наибольший темп развития обеспечивается, если межстадийный переход осуществляется в области точек A (S_1 -функции), C (S_2 -функции) и E (S_3 -функции). При этом огибающая линия 4 получает меньший наклон к оси абсцисс. В результате рост уровня критериев развития техники значительно ускоряется (моменты времени t_1, t_3, t_5 максимально сближаются, а моменты t_2, t_4

исчезают, сливаются с моментами t_1 и t_2 соответственно) и может оказывать не только существенное, но и определяющее влияние на успешное решение экономических и даже стратегических вопросов. Правда, такой успех, особенно в масштабах страны и мира, требует выделения и грамотного расходования огромных инвестиций. Но если уж в столь щедро финансируемой области техники захватывается лидерство, затраченные средства с лихвой окупаются.

Так, наивысший темп развития многих видов бытовой техники поддерживается, например, Японией. Благодаря ему Япония, не имея никаких полезных ископаемых, вышла в число наиболее развитых стран мира. Однако такой успех не был бы возможен, если бы японским специалистам не удалось в изделиях микроэлектронного и наноэлектронного исполнений обеспечить конструктивную, тепловую, электромагнитную и другие виды ТС.

А, к примеру, в США невиданных темпов достигло развитие военной техники. Так, если за период 1945–1963 гг. S-функция, интерпретирующая мировой прогресс развития военно-технических систем (ВТС), имеет довольно пологий вид с наклоном около 45° (рис. 3) [11], то за последние 8...10 лет эта кривая для ВТС только США существенно поднялась. Такая гонка вооружений оставила далеко позади остальные страны мира, прежде всего Россию. Она поддерживается умопомрачительными военными расходами, составившими в 2005 г. по разрешению конгресса почти 480 млрд долларов, не считая военной «помощи» других стран. Это превышает суммарный государственный бюджет всех остальных стран мира! Очевидно, такая акция США принята во исполнение плана продвижения к мировым ресурсам, к мировому господству.

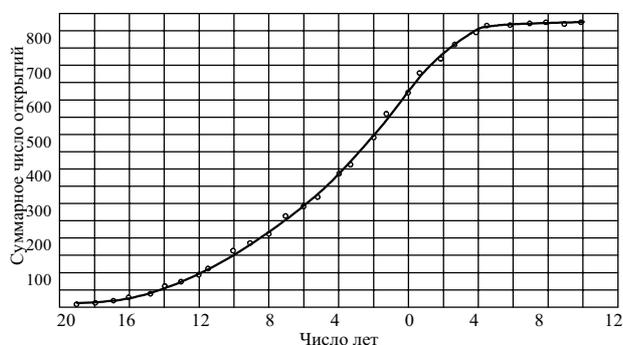


Рис. 3. Обобщенная характеристика процесса развития ВТС за 1945–1963 гг.

Ситуация усугубляется еще и тем, что получение сверхприбыли закономерно ведет к экологической катастрофе на Земле. Бурное развитие техники ухудшает ее экологическую совместимость (ЭКС). Эти два фактора оказались альтернативными. Чтобы поддерживать ЭКС на должном уровне, нужно или снижать темпы технического прогресса, или выделять огромные средства на экологические мероприятия. Первая мера носит нереальный характер, для второй необходимых средств, как правило, не находится.

Представленная статья является первой и пока единственной версией изложенной концепции по закономерностям ТС. Поэтому автор рассчитывает на критическое и деловое обсуждение ее научной общественностью в публикациях, на семинарах и конференциях.

Библиографический список

1. Глушков, В. М. Типовость и совместимость систем управления / В. М. Глушков, К. Н. Шихаев // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехн. 1971. Вып. 24. С. 3–9.
2. Буше, Н. А. Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытько. М.: Наука, 1981. 127 с.
3. ГОСТ 30709–2002. Техническая совместимость. Термины и определения. Минск: Межгосуд. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. 4 с.
4. ГОСТ 34.003–90. Информационная технология. Автоматизированные системы. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 17 с.
5. ГОСТ 30372–95/ГОСТ Р 50397–92. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1995. 9 с.
6. Гурвич, Н. С. Защита электронных вычислительных машин от внешних помех / И. С. Гурвич. М.: Энергия, 1975. 160 с.
7. Носенков, А. А. Совместимость как первооснова качества техники / А. А. Носенков // Проблемы обеспечения качества изделий в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф. / КрПИ. Красноярск, 1994. С. 423–430.
8. Носенков, А. А. Теория технической совместимости: диалектический базис, содержательный уровень, практический потенциал / А. А. Носенков / XXIV Российская школа по проблемам науки и технологии, посвящ. 80-летию со дня рожд. акад. В.П. Макеева: сб. науч. тр. / РАН. М., 2004. С. 101–112.
9. Альтшуллер, Г. С. Алгоритм изобретения / Г. С. Альтшуллер. М.: Моск. рабочий, 1973. 296 с.
10. Мелешенко, Ю. С. Техника и закономерности ее развития / Ю. С. Мелешенко. Л.: Лениздат, 1970. 246 с.
11. Каменев, А. Ф. Технические системы: закономерности развития / А. Ф. Каменев. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985. 216 с.
12. Половинкин, А. И. Основы инженерного творчества / А. И. Половинкин. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.
13. Костецкий, Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. Киев: Техника, 1970. 396 с.
14. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
15. Сугак, Е. В. Надежность технических систем / Е. В. Сугак, Н. В. Василенко, Г. Г. Назаров и др. Красноярск: МГПИ «РАСКО», 2001. 595 с.
16. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин / А. С. Проников. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с.

А. А. Nosenkov

ABOUT LAWS OF TECHNICAL COMPATIBILITY

Laws of process of maintenance of technical compatibility in interrelation with the general laws of development of engineering are considered.

А. А. Носенков, В. И. Медведев, А. М. Муллин

НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ И ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Обзорно рассматриваются некоторые основные виды и проблемы совместимости современной техники на примере космических аппаратов.

Среди множества различных видов технической совместимости (ТС), находящихся в центре внимания исследователей, приоритетное значение имеют конструктивная, технологическая, эксплуатационная, механическая, тепловая, экологическая, размерная совместимости и совместимость систем «человек–машина» (СЧМ). Дело в том, что эти виды ТС, как правило, наиболее проблематичны и характерны для большинства представителей современной техники.

Конструктивная совместимость (КС) технических устройств (ТУ) является предметом рассмотрения как в научных и инженерных работах, так и в нормативных документах. Например, в ГОСТ 22315–77 КС определена как согласованность состава и структуры ТУ, которая достигается установлением и применением единых форм конструктивных элементов, единых рядов габаритно-установочных и присоединительных размеров и допускаемых для этих размеров предельных отклонений [1]. В работе [2] под КС понимается свойство ТУ, обеспечивающее согласованность конструктивных параметров, эргономических, эстетических требований и механических совмещений (сопряжений) этих средств при совместном применении.

Для космических аппаратов (КА) задача обеспечения КС как самостоятельная не ставится, но тем не менее она представляет собой главную часть процесса разработки. Так, при проектировании КА в исходных данных особое место непременно занимает априори $\mathcal{A}^{[n]}$ в виде многокомпонентной совокупности физических связей параметров отдельных бортовых систем, характеристик конструкции, орбиты полета и программы работы аппарата [3]:

$$\mathcal{A}^{[n]} = \{A_1^{[n]}, A_2^{[n]}, \dots, A_n^{[n]}\}, \quad (1)$$

где n – количество компонент множества $\mathcal{A}^{[n]}$, $n \geq 20$.

При учете зависимости параметров всех систем от параметров орбиты, программы работы и конструкции КА задача обеспечения КС на строго оптимальном уровне становится практически невозможной. В этой связи речь идет о рациональном проектировании, когда в процессе разработки проекта КА достаточно глубоко анализируются его физические связи и реализуются хотя бы некоторые оптимальные или близкие к оптимальным сочетания параметров и характеристик.

Кроме рассмотренных выше аспектов, разработчикам КА приходится решать вопросы эргономического и эстетического содержания. Во-первых, КА являются объектами управления, тесно связанными с человеческим фактором (особенно при заводской отработке и наземной эксплуатации). Во-вторых, разработчики стремятся, чтобы КА не был результатом выполнения только компоновки, обеспечивающей согласованность параметров и характеристик устанавливаемых приборов и узлов, а содержал бы элементы дизайна и был привлекателен в технико-эстетическом отношении.

Таким образом, конструктивная совместимость КА может рассматриваться как частный вид ТС лишь чисто условно, так как она интегрирует в себе ряд более частных видов совместимости техники и представляет собой важнейшую часть выполняемых проектно-конструкторских задач. Более того, КС – потенциально огромное поле для творческой деятельности, в результате которой могут появляться принципиально новые, конкурентоспособные образцы техники.

Технологическая совместимость (ТхС) наиболее полно рассмотрена в работе [4]. Принципу ТхС здесь дана следующая формулировка: технологические объекты и оборудование могут быть совокупно объединены в систему, если они обладают свойством совместимости по наиболее существенным видам связей и отношений, т. е. такой общностью по выполняемым функциям, структурным и функциональным свойствам, благодаря которым обеспечивается их совместное функционирование как единой технологической системы в соответствии с заданными техническими требованиями. Этот принцип ТхС достаточно унифицирован и приемлем для технологических систем любого вида и масштаба [4; 5]. Так, фреза и шпиндель станка совместимы, если форма и размеры хвостовика фрезы соответствуют форме и размерам инструментального конуса шпинделя. Индуктор и контактные пластины станка для пайки радиодеталей токами высокой частоты (ТВЧ) совместимы, если геометрические и электрические параметры индуктора соответствуют геометрическим и электрическим параметрам пластин. Операции технологического процесса (ТП) совместимы, если состояние обрабатываемой детали на выходе одной операции будет исходным для других операций.

Методологическую концепцию ТхС можно обобщенно представить совокупностью нескольких основных положений. Определяющим моментом в обеспечении ТхС является проектирование ТП изготовления деталей, узлов и комплектующих изделий. Для ТП характерны материальные, энергетические и информационные связи с системами окружающей среды (рис. 1). В кибернетическом аспекте ТП представляет собой объект управления (рис. 1, а).

Математической моделью, отражающей множественный характер связей ТП с внешними системами, служит мультиграф (рис. 1, б). Множеству его вершин соответствуют рассматриваемый ТП и взаимодействующие с ним системы, а множеству дуг – связи и отношения между ТП и системами. В мультиграфе каждую пару вершин ТП и систем связывает не одна, а несколько дуг в соответствии с количеством связей между ними.

Совместимость подсистем технологической системы может осуществляться различными способами, каждый из которых характеризуется различной величиной затрат

на его реализацию. Это говорит о необходимости решения задачи по их системной оптимизации.

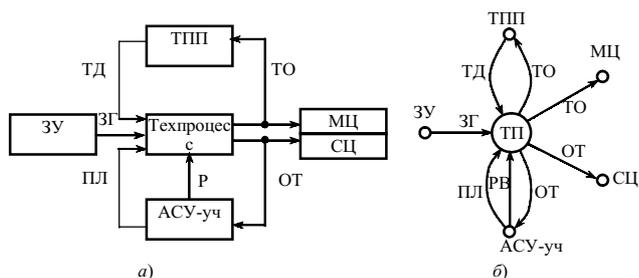


Рис. 1. Технологический процесс как объект управления (а) и его мультиграф (б): Пл – план; От – отклонения; РВ – регулирующие воздействия; ТД – технологическая документация; ТО – технологические отклонения; АСУ-уч. – АСУ участка; ТПП – технологическая подготовка производства; ЗУ – заготовительный участок; МЦ – механический цех; СЦ – сборочный цех; Зг – заготовки.

Оптимальным \mathcal{L}^* среди множества возможных $\mathcal{B} = \{\mathcal{L}_i\}$ будет такой способ внешней (с окружающей средой) или внутренней (структурных элементов между собой) совместимости системы, который обеспечивает заданные технические требования к взаимосвязи и взаимодействию совмещаемых объектов $\delta_q \geq \delta_{i \text{ доп}}$ при минимальных суммарных затратах на совместимость по всем видам связей e_j :

$$\mathcal{L}^* = \min_{\mathcal{L} \in \mathcal{B}} \sum_{j=1}^n e_j, \delta_q \geq \delta_{i \text{ доп}} \quad (2)$$

Так, с точки зрения этого утверждения, оптимальным по затратам на ТхС будет такой вариант ТП, который при обеспечении заданных производительности и точности обработки определяет минимальные затраты на специальные приспособления, вспомогательный инструмент, операции подготовки установочных баз и другие элементы, выполняющие функции совместимости.

Эксплуатационная совместимость (ЭксС) по ГОСТ 22315–77 – это согласованность технических характеристик, определяющих сохраняемость свойств техники в условиях эксплуатации [1]. В работе [2] под ЭксС понимается свойство технических средств, обеспечивающее согласованность эксплуатационных параметров этих средств при совместном применении в определенных условиях эксплуатации.

Первое из этих определений представляется несколько неоднозначным и усложненным, второе – достаточно конкретным, но не совсем корректным. Дело в том, что технические характеристики изделий подразделяются на тактико-технические (ТТХ) и эксплуатационно-технические (ЭТХ) [6]. При этом ТТХ (точность, мощность, скорость, чувствительность и т. п.) непосредственно связаны с целевым назначением ТУ, а ЭТХ (надежность, эксплуатационная технологичность, готовность и др.) – с процессом поддержания ТТХ на должном уровне в течение всего срока службы ТУ.

Следовательно, в первом определении ЭксС речь идет о согласованности ЭТХ во имя сохраняемости ТТХ. Во втором определении указывается, что ЭксС – свойство ТУ обеспечивать согласованность их ЭТХ при совместном

использовании. Здесь ТТХ непосредственно не упоминаются, однако любое изделие не может не иметь ТТХ, так как они являются целеобразующими характеристиками. Устойчивость этих характеристик в пространстве и во времени обеспечивается ЭТХ.

Надежность относится к основным ЭТХ. Если в начале становления теории надежности этим понятием охватывалась только безотказность, то в современном понимании к надежности относят еще долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность. При этом заслуживает внимание схема их взаимосвязи (рис. 2) [7].



Рис. 2. Схема взаимосвязей надежности и жизненного цикла техники

Эксплуатационная технологичность (ЭТ) – совокупность свойств конструкции ТУ, определяющих их приспособленность к проведению мероприятий по переводу в заданное состояние и к ТО. ЭТ характеризуется пятью параметрами: доступностью, контролепригодностью, взаимозаменяемостью, обеспеченностью ЗИП, легкосъемностью [8]. Хотя представленный параметрический состав ЭТ приводится для РЭА, он вполне приемлем для других видов техники, в том числе для КА. Правда, для последних он имеет место при заводских работах (сборочно-монтажных и испытательных) и наземной эксплуатации.

Готовность – свойство ТУ, заключающееся в его приспособленности к переводу из любого исходного состояния в состояние непосредственного использования по назначению. Эта ЭТХ является производной от совокупности свойств ТУ, определяющих его ЭТ и надежность. ТУ с более высокими ЭТ и надежностью при прочих равных условиях имеют и более высокую готовность.

Достаточная согласованность указанных выше ЭТХ позволяет обеспечить необходимую сохраняемость ТТХ при эксплуатации ТУ, т. е. ЭксС последних.

Механическая совместимость (МхС) – это способность ТУ функционировать с требуемым качеством при воздействии динамических механических нагрузок в реальных условиях эксплуатации [9].

В обеспечении МхС современной техники наиболее проблематичными являются динамические расчеты на этапе проектирования для определения прочности конструкции, вычисления резонансных частот и нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации [10]. При этом прежде всего выбирается динамическая (физическая) модель проектируемой конструкции (совокупность инерционных, упругих и демпфирующих элементов) с учетом спектральных составляющих динамического воздействия. Затем разрабатывается математическое описание этой модели, т. е. математическая модель конструкции, которая должна содержать замкнутую систему основных уравнений, а также способы задания начальных и граничных условий. Сложность конструкций современной техники такова, что моделирующие их упругие системы являются системами с

бесконечным числом степеней свободы или системами с распределенными параметрами, исследования которых весьма сложны и проводятся методами математической физики или вариационными методами. На практике обычно прибегают к упрощениям, предусматривающим переход от сложной системы к более простой, эквивалентной системе с одной или конечным числом степеней свободы, которая является системой с сосредоточенными параметрами, позволяющей выполнять исследования на основании уравнений Лагранжа.

При постановке задачи (динамических воздействий, начальных и граничных условий) в качестве физической модели обычно рассматривают колебания стержней и пластин, поскольку последние наиболее часто применяются в несущих конструкциях. Для однородного стержня уравнение одномерных малых продольных колебаний имеет вид

$$\partial^2 \xi / \partial t^2 = c^2 \partial^2 \xi / \partial x^2 + f(x, t), \quad c^2 = M_y / \rho, \quad (3)$$

где ξ – смещение (амплитуда) точки в момент t ; M_y – модуль упругости; ρ – плотность материала стержня; $f(x, t) = F(x, t) / \rho$ – плотность силы, отнесенная к единице массы; $F(x, t)$ – внешняя сила.

Для поперечных колебаний свободно изгибающейся однородной пластины аналогичный расчет ведут по уравнению гиперболического типа:

$$\partial^2 \xi / \partial t^2 = c^2 (\partial^2 \xi / \partial x^2 + \partial^2 \xi / \partial y^2) + f(x, y, t), \quad (4)$$

где $c^2 = \mathcal{F}_n / \rho$; $f(x, y, t) = F(x, y, t) / \rho$; \mathcal{F}_n – натяжение пластины; $F(x, y, t)$ – внешняя сила; $\xi(x, y, t)$ – перемещение (амплитуда) точек пластины.

В практике конструирования техники вибронгрузки задаются вполне определенными, нередко несколькими диапазонами частот. Так, для КА расчеты осуществляются по диапазонам частот средств транспортировки (автомобиля, железнодорожного транспорта, самолета) и выведения (ракеты-носителя).

В правильно сконструированном изделии собственная частота f_0 конструкции не должна находиться в спектре частот внешних воздействий. Хотя любая конструкция обладает несколькими значениями собственных частот, расчет выполняется только для низшего значения f_0 . Если оно входит в диапазон внешних воздействий, то конструкцию дорабатывают с целью увеличения этого значения f_0 и его выхода из спектра частот внешних воздействий. Для увеличения вибропрочности в конструкциях вводятся дополнительные крепления, ребра и рельефы жесткости, отбортовки, используются материалы с высоким демпфирующими свойствами, демпфирующие покрытия, а также специальные амортизаторы.

Таков краткий экскурс в сложнейшие теоретические расчеты и методологию обеспечения МхС современной техники. Однако здесь, как и в теории вообще, последнее слово принадлежит эксперименту, подтверждающему правильность этих расчетов. К примеру, при производстве КА изготавливается и испытывается на динамических стендах отдельный технологический образец аппарата. И во время этих испытаний задается весь диапазон возможных эксплуатационных динамических нагрузок.

Тепловая совместимость (ТпС) сводится к способности ТУ функционировать при воздействии штатных

температур и тепловых потоков в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством и не создавать недопустимые тепловые воздействия на другие технические устройства [8; 10].

Для многих видов техники, особенно для РЭА, ЭВМ, КА, обеспечение ТпС является одной из важнейших проблем процесса их разработки. Явно наблюдается даже своего рода парадокс: все новые достижения микроэлектроники порождают, как правило, новые проблемы ТпС. Эта ситуация объясняется взаимной непропорциональностью уменьшения габаритов аппаратуры и снижения ее электропотребления. Если, например, габариты уменьшаются в 5 раз, то при этом электропотребление снижается лишь в 3 раза. В итоге постоянно растет удельная тепловая нагрузка аппаратуры, чем создается тенденция к повышению температуры конструкции, большинство элементов которой имеют температурно-зависимые свойства.

В общем случае перенос тепловой энергии Φ_i от изотермической поверхности с температурой θ_i к изотермической поверхности с температурой θ_j описывается выражением [10]

$$\theta_i - \theta_j = F_{ij} \Phi_i \quad \text{или} \quad \theta_j - \theta_i = F_{ji} \Phi_j, \quad (5)$$

где $\theta_i - \theta_j$, $\theta_j - \theta_i$ – температурный напор; F_{ij} – коэффициент пропорциональности, или тепловой коэффициент ($F_{ij} = F_{ji}$), причем структура этого коэффициента зависит от реализованных в каждом конкретном случае способов переноса тепловой энергии (кондукции, конвекции, радиации).

Теплообмен кондукцией (теплопроводностью) осуществляется по закону Фурье, согласно которому для некоторой изотермической поверхности

$$\Phi_j^y = - \frac{\lambda d\theta}{dl}, \quad (6)$$

где Φ_j^y – количество тепловой энергии, проходящей через единицу площади S изотермической поверхности (плотность теплового потока), Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м · К).

Конвективный теплообмен связан с движением жидкой или газообразной среды, соприкасающейся с твердым телом (элементом конструкции). Конвекция заключается в совместном действии явлений теплопроводности среды, запасаения энергии в ней и ее перемешивания. Теплообмен конвекцией описывается законом Ньютона–Рихмана, согласно которому прямой или обратный тепловой поток, Вт, между поверхностью твердого тела и средой

$$\Phi_{ic} = \alpha_{ic} (\theta_i - \theta_c) S_i, \quad (7)$$

где α_{ic} – коэффициент теплообмена конвекцией между поверхностью тела и средой, Вт/(м² · К); θ_i и θ_c – температуры поверхности тела и среды; S_i – площадь поверхности теплообмена тела, м².

Радиационный теплообмен осуществляется электромагнитными волнами в инфракрасном диапазоне. По закону Стефана–Больцмана, Вт, энергия, излучаемая в пространство

$$\Phi = \varepsilon C_0 S (\theta/100)^4, \quad (8)$$

где ε – степень черноты тела; $C_0 = 5,67$ Вт/(м² · К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела; S – площадь излучающей поверхности, м²; θ – температура тела.

По всем трем видам теплообмена расчеты осуществляются с использованием необходимых табличных данных и соответствующих моделей.

Для полного анализа температурного режима всего КА необходимо иметь систему уравнений, состоящую из уравнения для аппарата в целом и уравнений для всех бортовых элементов. Такая система уравнений получается чрезвычайно громоздкой даже для малых КА. Поэтому обычно используют приближенные методы анализа и расчета. Наиболее распространенным приближенным подходом является рассмотрение только установившихся температурных процессов для различных режимов работы КА. Конечная цель такого подхода состоит в получении достаточного количества точек температурных режимов, позволяющего аппроксимировать весь тепловой режим аппарата.

Физическая причина повышенной сложности обеспечения ТпС заключается в одновременном проявлении всех трех видов теплообмена между многими элементами аппарата, т. е. в их многократной суперпозиции.

Большое, а нередко и решающее влияние в обеспечении ТпС КА имеет компоновка бортовых приборов и узлов. При этом ТпС расположенных рядом тепловыделяющих и теплочувствительных элементов достигается за счет установки тепловых экранов или их разнесением на несущей конструкции.

Полученная точность такого приближенного подхода позволяет довольно успешно выполнять проектно-конструкторские разработки КА. Однако окончательные выводы об уровне достаточности ТпС делаются с учетом результатов экспериментальных проверок тепловых режимов. С этой целью изготавливается и экспериментально отрабатывается специальный тепловой макет аппарата.

С экологической совместимостью (ЭКС) связывают возможность создания такой техники, функционирование и утилизация которой не нанесут недопустимого ущерба биосфере [11].

Биосфера представляет собой грандиозную равновесную систему с непрерывным круговоротом вещества и энергии, в которой активную роль играют микроорганизмы. В реальных экосистемах (леса, моря и др.) круговорот (функционирование) бывает незамкнутым, так как часть веществ уходит за пределы экосистемы, а часть поступает извне. Но в целом круговорот в природе сохраняется. Вещества движутся от одного компонента системы к другому, отражая известную общую закономерность круговорота веществ в природе, например атмосферного воздуха. Все организмы потребляют его при дыхании, а выделяют кислород в окружающую среду только растения путем фотосинтеза, использующего энергию солнечного излучения.

Вмешательство человека посредством создания и эксплуатации техники отрицательно влияет на процессы круговорота. Самыми распространенными веществами, загрязняющими биосферу, являются оксид углерода CO , диоксид серы SO_2 , оксид азота NO , углеводороды CH_4 , свинец, ртуть и радиоактивные изотопы. Экологи предупреждают, что если не удастся уменьшить выброс углекислого газа, то нашу планету ожидает катастрофа, связанная с так называемым парниковым эффектом. Загрязнения губят растительность и животный мир, ухудшают климат. На-

пример, в Польше погибает 97 %, а на Украине – 84 % леса. Состояние биосферы сейчас оценивается как критическое, наносящее огромный ущерб и здоровью человека.

Все сказанное относится к проблеме ЭКС химического и организационного характера. Однако развитие техники породило и серьезно усугубляет проблему обеспечения ЭКС физического характера, которая приобретает высокую прогрессирующую опасность для людей, животного и растительного мира. Речь идет о генерации интенсивных электромагнитных излучений (ЭМИ) устройствами радиосвязи и электроэнергетики. Паутины электроприборов окружают человека повсюду. Радиопередающие станции создают глобальные электромагнитные поля (ЭМП). В большинстве своем они имеют телевизоры, а многие – компьютеры, которые также создают ЭМП. Все чаще появляются сведения об электромагнитной опасности сотовой связи. В лексиконе исследователей становится обычным разговор про электромагнитный смог, который постепенно становится одним из основных факторов загрязнения окружающей среды. При всей этой реальной опасности до сих пор нормативно не определена стратегия обеспечения защитных мер. В целом эта часть ЭКС представляется *биоэлектромагнитной совместимостью* (БЭМС).

В работе [12] излагается новая концепция создания биологически безопасных электронных устройств (компьютеров, телевизоров, мобильных телефонов). Она основывается не на идеях экранирования, а на принципиально новом подходе, учитывающем геометрические особенности ЭМП искусственного происхождения. Авторы ссылаются на исследования, проведенные учеными Швеции и США и показавшие, что ЭМП технического происхождения даже в сотни раз слабее естественного поля Земли являются опасными для здоровья. Например, напряженность электрического поля в зоне компьютерного монитора, как и многих других приборов и аппаратов, обычно составляет 1...10 В/м, магнитная индукция – 0,1...10 мГс, что значительно ниже естественного фона Земли (соответственно 140 В/м и около 400 мГс). Однако эти техногенные поля опасны для человека, а природные поля полезны. Риск возникновения онкологических заболеваний увеличивается уже при достижении магнитной индукции уровня 3 мГс. Генетики установили, что ЭМП, создаваемое компьютером, приводит к необратимым изменениям в делящихся клетках.

В этой связи авторы работы [12] выдвигают гипотезу, что причина высокой опасности низкоинтенсивных искусственных ЭМП кроется в том, что эти поля имеют антиприродную структуру. Они утверждают, что природа и все живое развиваются по строгому закону в левовинтовых асимметричных ЭМП (рис. 3, а, 4...6), а искусственные ЭМП имеют правовинтовую асимметрию (рис. 3, б).

Это нарушение фундаментальной природной асимметрии и является губительным для человека, находящегося в зоне искусственных ЭМП. Предполагается, что у биосистем существует особый механизм поглощения энергии ЭМП и превращения ее в электричество, который до сих пор не имел аналогов в технике. Процесс преобразования энергии в клетках происходит под воздействием ЭМП в физической среде, не обладающей маг-

нитными свойствами. При этом отсутствуют привычные резонансные контуры и индуктивности. Так что не всегда нужно искать аналогию с известными радиотехническими методами при объяснении явлений поглощения или преобразования энергии. Так, экранирование позволяет уменьшить энергию ЭМП в окружающем пространстве, но никак не влияет на структуру поля. Поэтому фактор, оказывающий вредное воздействие на человека, остается неустранимым. Следовательно, нужны принципиально новые решения проблемы ЭКС в части биологической безопасности искусственных ЭМП путем перестройки их структуры.

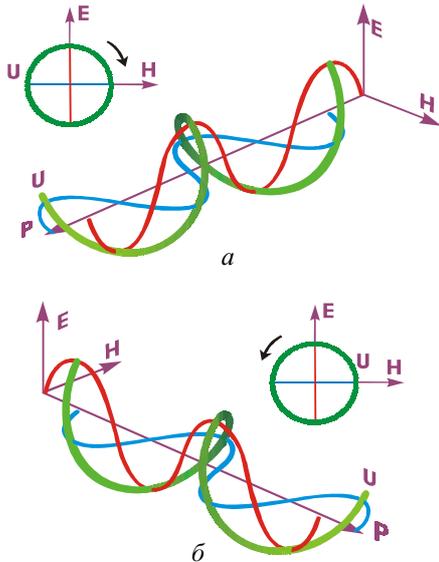


Рис. 3. Винтовая асимметрия электромагнитных полей: а – левовинтовое поле; б – правовинтовое поле

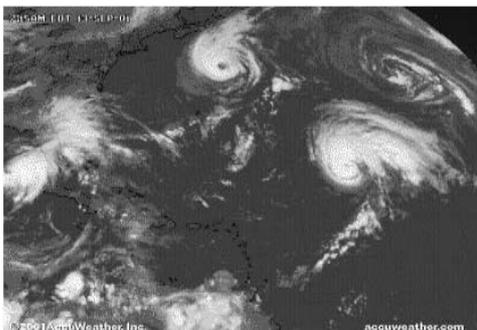


Рис. 4. Левовинтовая асимметрия циклонов

Если сторонники этого подхода правы, то выходит, что принятый ныне методологический подход, учитывающий только уровневую оценку ЭМП, уводит творческую мысль в тупик, а все инженерные разработки, реализующие его, бесперспективны.

Казалось бы, изложенная гипотеза достойна очень серьезного внимания и всестороннего исследования. Однако, насколько известно авторам, учение об асимметрии ЭМП воспринимается многими учеными как лженаука, хотя при этом не выдвигается какая-то убедительная противоположная методологическая разработка.

Таким образом, на пути решения актуальнейшей проблемы ЭКС имеются серьезные и пока непреодолимые препятствия как социально-экономического, так и научного характера.

Затронутая проблема обеспечения ЭКС в части БЭМС весьма актуальна и для создателей КА, поскольку многие из них непосредственно заняты отработкой антенно-фидерных устройств (АФУ) и радиоиспытаниями изделий.

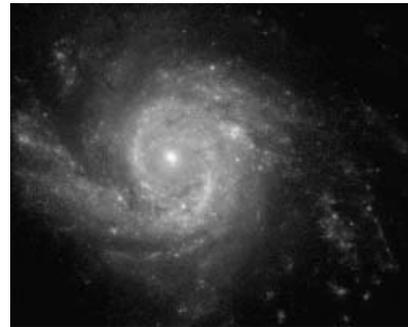


Рис. 5. Спиральная галактика



Рис. 6. Левовинтовая двойная спираль ДНК

Размерная совместимость (РзС) предусматривает взаимное назначение для сопрягаемых частей изделия габаритных и присоединительных размеров, а также совмещаемых электрических параметров в пределах предусмотренных допусков [2, 8]. Производственные допуски, установленные на изделие, ограничивают поле рассеяния параметров, вызванное производственными погрешностями при нормальных условиях эксплуатации. Обычно принимают гауссовский закон распределения случайных величин – параметров (отклонений параметров) элементов и систем (рис. 7). При этом

$$f(\Delta \bar{A}) = \left[1 / \sqrt{2\pi\sigma(\Delta \bar{A})} \right] \exp \left\{ - [\Delta \bar{A} - M(\Delta \bar{A})]^2 / 2\sigma^2(\Delta \bar{A}) \right\}, \quad (9)$$

$$m(\Delta \bar{A}) = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta \bar{A} \cdot f(\Delta \bar{A}) d(\Delta \bar{A}). \quad (10)$$

Дисперсия отклонения

$$\sigma^2(\Delta \bar{A}) = \int_{-\infty}^{\infty} [\Delta \bar{A} - m(\Delta \bar{A})]^2 \cdot f(\Delta \bar{A}) \cdot d(\Delta \bar{A}). \quad (11)$$

Для расчета размерных цепей (РЦ) и замыкающих звеньев (ЗЗ) используют минимаксный и вероятностный методы. При каждом из них возможны два способа достижения заданной точности ЗЗ:

- 1) способ взаимозаменяемости, при котором необходимая точность достигается без подбора, регулировки или подгонки составляющих звеньев (СЗ);
- 2) способ компенсации, при котором заданная точность обеспечивается за счет введения компенсирующего звена.

В крупносерийном и массовом производстве используют вероятностный метод. При этом предполагают, что

размеры партии деталей представляют собой случайные величины, распределенные в пределах поля допуска по гауссовскому закону, т. е. большинство деталей имеют размеры, близкие к среднему, и только весьма малое их количество имеют размеры на границах поля допуска. Поэтому при определенном проценте брака

$$P_{\text{бр}}(t) = 1 - P_{\text{н}}(t), \quad (12)$$

где $P_{\text{н}}(t)$ – вероятность того, что действительное значение выходного параметра детали находится в пределах поля допуска. Можно расширить допуски на размеры СЗ и, следовательно, снизить стоимость изготовления деталей.

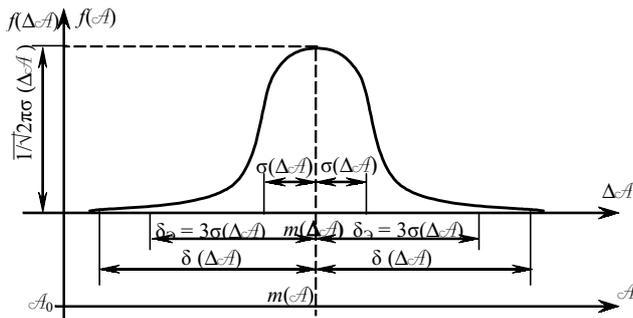


Рис. 7. Распределение плотности вероятности отклонения параметра: \bar{A} – текущее значение выходного параметра; A_0 – номинальное значение параметра; $f(\Delta \bar{A})$ – плотность вероятности отклонения параметра; $m(\Delta \bar{A})$ – среднее значение отклонения параметра; $m(\bar{A})$ – среднее значение параметра; $\delta(\Delta \bar{A})$ – допустимое отклонение параметра; σ – среднее квадратическое отклонение; $\delta_э$ – эксплуатационный допуск

Из всего изложенного следует, что процесс обеспечения РЗС носит аналитический характер. Этот вид ТС в настоящее время проходит через очередной период методической реорганизации в связи с внедрением международных стандартов.

Совместимость СЧМ. Значительную часть современной техники составляют СЧМ. В этой связи проблема совместимости СЧМ представляет актуальный интерес для науки и инженерии. Совместимость СЧМ – согласованность возможностей человека-оператора (ЧО) с машиной и средой, обеспечивающая наиболее эффективное функционирование СЧМ [13, 14]. В работе [13] определено пять частных видов совместимости СЧМ.

Энергетическая совместимость (ЭНС) предусматривает создание такой машины и органов управления, чтобы и машина, и ЧО гармонизовали в отношении требуемых для управления силы, мощности, скорости, точности и темпа управляющих действий, оптимальной загрузки конечностей ЧО, включенных в управление и разделения функций между ними. Опыт создания и эксплуатации СЧМ показывает, что наиболее часто приходится отдавать предпочтение принципу последовательных действий с оценкой упорядоченности расположения органов управления и индикации на пульте управления (ПУ).

Информационная совместимость (ИС) требует, чтобы была создана такая информационная модель (ИМ), адекватная машине, которая соответствовала бы возможностям ЧО по приему и переработке всего потока закодированной информации и эффективному приложению

управляющих воздействий к машине. Прием информации ЧО необходимо рассматривать как процесс формирования перцептивного (чувственного) образа, под которым понимается субъективное отражение в сознании человека свойств действующего на него объекта. Формирование перцептивного образа является фазным (поэтапным) процессом, состоящим из трех стадий: обнаружения, различения и опознания. Длительность этих стадий зависит от сложности принимаемого сигнала. В зависимости от модальности поступающего сигнала используются разные виды анализаторов. Наибольшее значение для деятельности ЧО имеет зрительный анализатор, за ним следуют слуховой и тактильный (осязательный) анализаторы. Участие других анализаторов в деятельности ЧО невелико.

Пространственно-антропометрическая совместимость (ПАС) ЧО и машины состоит в том, чтобы исходя из антропометрических характеристик (АХ) и некоторых физиологических особенностей ЧО (динамическая антропометрия), а также условий, диктуемых конкретной задачей, создать требуемое рабочее место. Для этой совместимости АХ имеют определяющее значение. Они включают различные размеры человеческого тела и делятся на динамические и статические.

Следует отметить, что в условиях нормальной работы ПАС менее критична, чем ЭНС и ИС. Однако при аварийных и катастрофических ситуациях СЧМ недостаточность ПАС, например при малом объеме оперативного пространства (на космических кораблях, самолетах, подводных лодках), может оказаться наиболее усугубляющим фактором негативных последствий.

Биофизическая совместимость (БФС) состоит в том, чтобы достичь разумного компромисса между физиологическим состоянием и работоспособностью ЧО и различными факторами рабочей среды (РС) с учетом объема, качества выполняемых задач и продолжительности работы.

Факторы РС могут оказывать как прямое, так и косвенное влияние на состояние и качество работы ЧО. Так, прямое влияние шума заключается, например, в создании помех при организации речевого ввода-вывода информации и т. д. Результатом косвенного влияния шума является сужение концентрации внимания.

При проектировании СЧМ для обеспечения достаточной БФС учитываются следующие положения:

- 1) нормируемые производственные факторы при их обычном или комплексном воздействии не должны оказывать отрицательного влияния на здоровье ЧО и всего персонала при профессиональной деятельности в течение продолжительного времени;
- 2) допустимые параметры неблагоприятных факторов по длительности и интенсивности воздействия не должны вызывать в процессе рабочего дня снижения надежности и эффективности деятельности ЧО.

Технико-эстетическая совместимость (ТЭС) предусматривает введение в основное содержание труда ЧО элементов творческой целенаправленности, обеспечивающих эстетическую удовлетворенность трудом; введение художественных элементов в процессе труда, логически завершающих психофизиологически удовлетворительный труд ЧО. ТЭС пока еще не получила развитого аналитического толкования. Однако она является важной состав-

ной частью научной базы продуцирующей, созидательной деятельности ЧО. Она изучает социально-культурные, технические и эстетические проблемы формирования гармонической предметной среды, создаваемой средствами промышленного производства для обеспечения наилучших условий труда, быта и отдыха человека.

Когнитивная совместимость (КГС) впервые была упомянута в работе по эргономике [15]. Однако при этом не дана даже вербальная трактовка понятия такой совместимости. Когнитивность на латинском языке означает знание, познание. Когнитивную совместимость СЧМ можно трактовать как соответствие познавательной способности человека уровню сложности работы с машиной и ее программного обеспечения. Определяющее значение в обеспечении познавательной способности имеют три компонента: интеллектуальные способности, профессиональные способности и навыки, а также психолого-физиологические способности человека.

Таким образом, проблема обеспечения совместимости СЧМ многокомпонентна и сложна, требует от создателей этой системы глубокого и комплексного технического знания, широкого инженерного кругозора, достаточного художественно-эстетического вкуса, опыта и мастерства. Здесь имеет место большой оперативный простор для творческой инженерной и научной деятельности.

В целом исследование ТС инженерами и учеными приобретает все большую актуальность для решения проблемы совершенствования современной техники [16]. Авторы статьи ставили своей целью показать масштабы и актуальность этой проблемы лишь на узловых моментах обеспечения некоторых видов ТС, поскольку более подробное их рассмотрение проблематично даже для монографии, а для статьи – просто невозможно, ведь число исследуемых видов ТС перевалило уже за 40. Насколько этот замысел удался – судить научной общественности.

Библиографический список

1. ГОСТ 22315–77. Средства агрегатные информационно-измерительных систем. Общие положения. М.: Издво стандартов, 1977. 16 с.
2. Каверкин, И. Я. Анализ и синтез измерительных систем / И. Я. Каверкин, Э. И. Цветков. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1974. 158 с.
3. Максимов, Г. Ю. Теоретические основы разработки космических аппаратов / Г. Ю. Максимов. М.: Наука, 1980. 320 с.
4. Цветков, В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических

процессов / В. Д. Цветков. Минск: Наука и техника, 1979. 264 с.

5. Аргазов, И. В. О проблеме формирования современной технологической науки в области машиностроения / И. В. Аргазов, А. А. Носенков // САКС-2001: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (1–4 дек. 2001, г. Красноярск) / САА. Ч. II. Красноярск, 2001. С. 171–173.

6. Теоретические основы эксплуатации средств автоматизированного управления / Б. С. Абраменко, Г. И. Владимирович, А. Я. Маслов и др.; под общ. ред. А. А. Воронина; МО СССР. М., 1974. 430 с.

7. Сугак, Е. В. Надежность технических систем: учеб. пособие для вузов / Е. В. Сугак, Н. В. Василенко, Г. Г. Назаров. Красноярск: МГП «РАСКО», 2001. 595 с.

8. Гелль, П. П. Конструирование и микроминиатюризация радиоэлектронной аппаратуры / П. П. Гелль, Н. К. Иванов-Есипович. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. 536 с.

9. Гурвич, Н. С. Защита электронных вычислительных машин от внешних помех / Н. С. Гурвич. М.: Энергия, 1975. 160 с.

10. Справочник конструктора РЭА: общие принципы конструирования / под ред. Р. Г. Варламова. М.: Сов. радио, 1980. 480 с.

11. Безопасность жизнедеятельности / Э. А. Арустамов, А. Е. Волощенко, Г. В. Гуськов; под ред. проф. Э. А. Арустамова. М.: Изд. дом «Дашков и К», 2001. 678 с.

12. Косинов, Н. В. Почему компьютеры опасны для здоровья, и как их сделать безопасными / Н. В. Косинов, В. И. Гавбарук, В. В. Поляков // НИТ: Разработки в электронике. 2004. Март. № 2. С. 16–20.

13. Денисов, В. Г. Человек и машина в системе управления / В. Г. Денисов. М.: Знание, 1973. 64 с.

14. Муллин, А. М. Совместимость как один из путей повышения эффективности систем «человек–машина» / А. М. Муллин, В. И. Медведев // Современные техника и технологии (СТТ-2004): материалы докл. Междунар. конф. Томск, 2004. С. 105–107.

15. Мунипов, В. М. Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды / В. М. Мунипов, В. П. Зинченко. М.: Логос, 2001. 356 с.

16. Носенков, А. А. Некоторые вопросы теоретического и инженерного обеспечения совместимости современной техники / А. А. Носенков, А. А. Ковель, В. И. Медведев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева / под ред. проф. Г. П. Белякова / СибГАУ. Вып. 4. Красноярск, 2003. С. 130–138.

A. A. Nosenkov, V. I. Medvedev, A. M. Mullin

SOME KINDS AND PROBLEMS OF TECHNICAL COMPATIBILITY

In article some basic kinds and problems of compatibility of modern engineering with accent on space vehicles are considered.

С. П. Саханский, В. Д. Лаптенко

СОВМЕЩЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫРАЩИВАНИЕМ МОНОКРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТАКТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРА И ОДНОВРЕМЕННОГО ВЫТЯГИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛА ИЗ ФИЛЬЕРЫ СПОСОБОМ СТЕПАНОВА

Разработан контактный метод управления выращиванием монокристаллического слитка из расплава по способу Чохральского с точностью до 0,2 мм. Обосновывается возможность одновременной работы системы контроля диаметра кристалла и вытягивания кристалла из фильеры способом Степанова.

Советский ученый-физик Степанов, занимавшийся выращиванием кристаллов металлов и полупроводников, предложил формировать мениск при помощи специальных формообразователей, помещенных в раствор так, чтобы мениск расплава приподнимался над отверстием в поплавке, лежащем на поверхности расплава в тигле и изготовленном из материала, не смачиваемого расплавом, т. е. способ Степанова основан на кристаллизации расплава, подаваемого в щель формообразователя под давлением 5...6 г/см². Такое давление создается либо погружением за счет веса формообразователя на глубину 8...9 мм в расплав, либо воздействием на расплав гидравлического или газового давления. Способ Степанова позволяет поддерживать скорость вытягивания и температуру в зоне преобразователя с меньшей точностью по сравнению со способом Чохральского. В частности, температуру в зоне фронта кристаллизации можно поддерживать с меньшей точностью, в диапазоне $\pm 0,5^\circ\text{C}$, что не приводит к нарушению монороста или обрыву роста слитка.

Формообразователь выравнивает тепловое поле вблизи столба расплава, экранирует тепловое поле расплава в тигле от теплового поля в столбике расплава и в растущем кристалле, уменьшая тем самым колебания температуры вблизи фронта кристаллизации, обеспечивает симметрию теплового поля, влияет на распределение дислокаций и примесей в кристалле, обеспечивает для германия точность стабилизации растущего диаметра порядка 0,5 мм.

Принцип совмещения системы управления, основанный на контактном методе управления диаметром кристалла, с вытягиванием монокристалла германия через фильеру (см. рисунок), заключается в следующем:

1) в тигле, который вращается вокруг оси, с угловой скоростью W_τ и имеет внутренний диаметр D , находится жидкий расплавленный металл. Кристалл диаметром d_ϕ вытягивается из фильеры со скоростью вытягивания V_3 и скоростью вращения W_3 затравки;

2) весь процесс проводится в камере с инертным газом или в вакууме. Температура расплава поддерживается за счет управления мощностью нагревателя печи на основе показаний датчика температуры T_3 боковой точки нагревателя стандартным управляемым регулятором температуры. На поверхности расплава плавает электропроводная фильера, относительно которой замыкается и размыкается контактный датчик, дающий в систему управления сигнал CD об изменении уровня расплава в процессе выращивания кристалла;

3) стабилизация уровня расплава в тигле происходит за счет управления скоростью подъема тигля вверх V_τ на основе сигнала с контактного датчика.

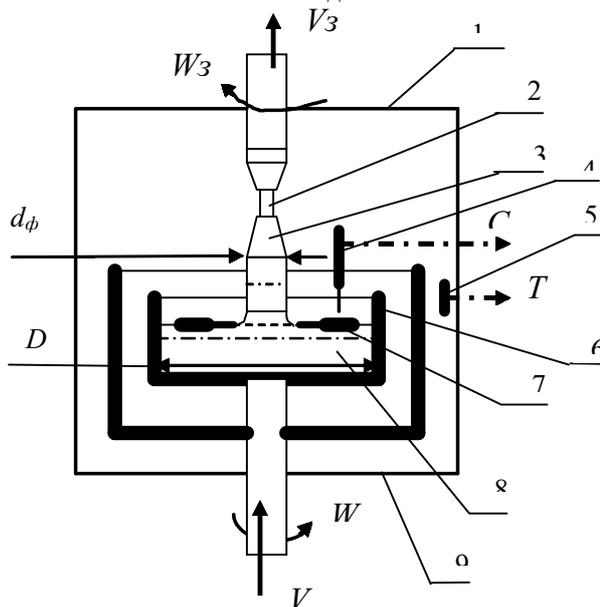


Схема совмещения контактного метода

с выращиванием кристалла из фильеры: 1 – нагреватель; 2 – затравка; 3 – кристалл; 4 – датчик; 5 – датчик температуры; 6 – тигель; 7 – фильера; 8 – расплав металла; 9 – камера

При использовании алгоритмов работы высокоточной системы управления, с ценой непосредственно оцениваемых дискрет по перемещению затравки и тигля не менее 0,1 мкм, контактный метод управления диаметром кристалла [2...4] обеспечивает чувствительность работы системы управления не менее 0,2 мм в зоне $\pm 0,5$ мм, что соответствует зоне работы фильеры.

Данная чувствительность позволяет при вытягивании слитка из фильеры способом Степанова корректировать по сигналу управления температуру нагревателя и скорость вытягивания, улучшая тем самым условия вытягивания и обеспечивая условия выращивания монокристаллической структуры кристаллов, особенно когда через фильеру выращиваются слитки германия диаметром больше 100 мм.

Библиографический список

1. Нашельский, А. Я. Производство полупроводниковых материалов / А. Я. Нашельский. М.: Металлургия, 1989. 270 с.

2. Пат. 2128250 РФ. Способ управления процессом выращивания монокристаллов из расплава и устройства для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик, В. Д. Лаптенюк. Опубл. 27.03.99.

3. Пат. 2184803 РФ. Способ управления процессом выращивания монокристаллов из расплава и устройства для его осуществления / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Ф. Петрик, В. Д. Лаптенюк. Опубл. 10.07.02.

4. Саханский, С. П. Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава / С. П. Саханский, О. И. Подкопаев, В. Д. Лаптенюк // Перспективные материалы, технологии, конструкции-экономика: сб. научн. тр. / под ред. проф. В. В. Стацурь; ГАЦ-МиЗ. Вып. 6. Красноярск, 2000. С. 391–393.

S. P. Sakhansky, V. D. Laptенок

COMBINATION OF OPERATION SYSTEM OF GERMANIUM MONOCRYSTAL GROWING BY CONTACT METHOD OF DIAMETER MEASUREMENT AND SIMULTANEOUS MONOCRYSTAL PULLING FROM FORMING BUSHING BY STEPANOV'S METHOD

In the worked out contact method of operation of monocrystal ingot growing from melt by Czochralski method with accuracy up to 0.2 mm a capacity of simultaneous operation of crystal diameter control system and crystal pulling from forming bushing by Stepanov's method is proved.

УДК 621.795 (621.92.)

А. С. Сысоев, С. К. Сысоев, В. А. Левко, П. А. Снетков, Л. В. Зверинцева

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОНИНГОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Описано исследование процесса хонингования заготовок трубопроводов, имеющих продольную подачу относительно инструмента по всей ее длине, с использованием эластичного инструмента, вибрирующего с частотой до 30 Гц и амплитудой до 2 мм. Шероховатость поверхностей за 10 мин уменьшается с 5...7 мкм до 0,2 мкм.

В летательных аппаратах широко используют трубопроводы для транспортировки жидкости и газа, передачи сверхвысоких частот (СВЧ) миллиметрового диапазона и др. Шероховатость внутренней поверхности заготовок для передающих устройств летательных аппаратов не соответствует растущим требованиям к снижению сопротивления среды и повышению КПД при передаче энергии.

Например, в приборах антенно-фидерных устройств (АФУ) для передачи энергии сверхвысоких частот (СВЧ) применяют волноводы миллиметрового диапазона (ВММД). Одной из основных характеристик приборов АФУ является величина потерь энергии, обусловленной состоянием качества поверхностного слоя токонесущих поверхностей ВММД. Величина потерь непосредственно определяет эффективность передачи энергии и возможность передачи больших и малых мощностей. С уменьшением потерь КПД линии увеличивается. Кроме того, потери в линии СВЧ при передаче средних и высоких мощностей могут привести к разогреву линии. При передаче малых мощностей собственные шумы линии, обусловленные потерями, становятся соизмеримыми с величиной полезного сигнала. Поэтому уменьшение потерь при передаче энергии является одной из основных задач при создании АФУ.

Известно, что СВЧ-токи сосредоточены преимущественно в поверхностном слое проводника, поэтому собственные потери устройств зависят от свойств поверхностного слоя металла проводника, определяемого глубиной проникновения СВЧ-тока. С увеличением частоты тока глубина проникновения СВЧ-тока уменьшается и становится соизмеримой с микронеровностями поверхностного слоя [1]. Потери в приборах АФУ, в частности в волноводах, обусловленные величиной микронеровностей поверхности, являются функцией частоты. Экспериментально установлено, что при высоте микронеровностей, равной глубине проникновения тока, коэффициент затухания возрастает в 1,6 раза [2]. При высоте микронеровностей вдвое больше глубины проникновения он возрастает в 1,8 раза, а при высоте микронеровностей, равной половине глубины проникновения, – в 1,2 раза. Максимальная величина шероховатости поверхности проводника не должна превышать половины глубины проникновения СВЧ-тока. Для эффективной работы АФУ необходимо обеспечить шероховатость внутренних токонесущих поверхностей заготовок $R_a = 0,2...0,4$ мкм.

Аналогичное влияние оказывает качество на сопротивление при транспортировке жидкости и газа в системе питания ЛА компонентами поверхностного слоя внут-

ренней поверхности труб. Сопротивление среды уменьшает КПД системы.

Анализ существующих технологических процессов изготовления труб показал, что операции финишной обработки внутренних поверхностей предпочтительно проводить на заготовках труб, причем наиболее сложной является отделка прямоугольных каналов, так как в заготовке невозможно применение вращательного движения инструмента (или заготовки).

Из рассмотренных методов финишной обработки прямоугольного канала: электрохимических и электро-механических, гидро-, пневмо-, турбо-, магнитоабразивного и др., был выбран способ хонингования эластичным притиром с наложением вибрации (ЭЛХОН).

В связи с особенностями конструкции волновода инструмент должен обеспечивать необходимые и равные по величине силы резания вдоль всего обрабатываемого канала.

Рассмотрим условия взаимодействия эластичного притира, наполненного абразивным зерном (АЗ), с поверхностью канала. Принцип резания АЗ аналогичен для всех видов абразивной обработки. Однако в случае применения способа ЭЛХОН можно выделить некоторые особенности.

1. Обработка осуществляется композиционным инструментом, состоящим из эластичного притира, абразивных зерен и основы (носителя абразивных зерен). Обеспечение удовлетворительных показателей обработки основано на стабилизации условий взаимодействия указанных элементов с обрабатываемой поверхностью. Когда АЗ находятся в незакрепленном состоянии, рабочая поверхность притира является основанием для перемещающихся зерен в зазоре между заготовкой и притиром. Взаимодействие притира с обрабатываемой поверхностью заготовки через абразивную прослойку следует рассматривать как динамическое, осуществляемое при перемещении притира с относительной скоростью $S_{пр}$ под действием внешней силы P_z и нормальной силы P_y . Сила сопротивления F движению притира и нормальная сила реакции P_f является усредненным значением сил взаимодействия притира через отдельные АЗ и неабразивную часть прослойки с заготовкой. Постоянство во времени силы F , направленной по касательной к поверхности заготовки навстречу скорости V , будет свидетельствовать о стабильности процесса доводки. Если сила F постоянна, то будет неизменной усредненная сила P_y , которая возникает от действия упругих напряжений s , развивающихся в результате внедрения отдельного АЗ в материал притира, и зависит от величины предварительного

натяга, с которым притир входит в деталь. Следовательно, от точности изготовления размеров инструмента в полной мере зависит стабильность процесса резания металла. На участках взаимодействия поверхностей возможно интенсивное изменение размеров не только материала заготовки, но и инструмента.

2. Процесс доводки обычно осуществляется с различной скоростью движения притира V , причем съем металла повышается с ее увеличением [3]. При доводке незакрепленными АЗ его воздействие на обрабатываемую поверхность носит случайный динамический характер. Это приводит к образованию в материале поверхностного слоя нестабильного переменного напряженного состояния. Движение АЗ с переменной скоростью приводит к изменению скорости деформации и, следовательно, к неравномерному распределению деформаций и напряжений в локальных микрообъемах поверхностных слоев контактирующих тел. Характер разрушения поверхностного слоя определяется уровнем этих напряжений и физико-химическими свойствами материалов.

3. Процесс доводки незакрепленными абразивными зернами характеризуется различной степенью подвижности зерен, находящихся в прослойке между притиром и заготовкой. Абразивное зерно в зоне контакта может находиться в свободном, полужакопленном и зажакопленном состоянии. Соответственно меняется и характер взаимодействия микровыступов единичного зерна с обрабатываемой поверхностью. Процесс взаимодействия незакрепленного АЗ с поверхностью заготовки может происходить в результате соударения АЗ с обрабатываемой поверхностью. В некоторых случаях это результат вибрационно-ударного воздействия притира на АЗ в нормальном и касательном направлениях при мгновенном зажакоплении их в притире [4].

В общем случае при резании отдельным АЗ возможны несколько видов контакта с обрабатываемой поверхностью в условиях упругого и пластического деформирования, микрорезания при непрерывном и прерывистом контакте с поверхностью заготовки, а также микрорезного выкалывания. Для увеличения производительности обработки предпочтительнее непрерывный контакт острых граней АЗ с поверхностью канала заготовки.

Для выбора конструкции инструмента нами проведен патентно-технический поиск, который позволил разработать новую конструкцию инструмента (рис. 1) [5]. Фаски на притире облегчают ввод инструмента в обрабатываемый канал. Изготовление инструмента с требуемой точностью $\pm 0,05$ мм механическими способами затруднено из-за низкой обрабатываемости полиуретана.

Для изготовления эластичных притиров разработана технология отливки эластичного инструмента в специальную форму, имитирующую форму сечения обрабатываемого канала. После смешения расплавленного жидкого каучука СКУ ПФЛ с порошкообразным диаметром-Х и выдержке при температуре 130 °С в форме в течение 30...45 мин происходит вулканизация компонентов с образованием полиуретана.

Нами предложен способ обработки каналов, в соответствии с которым изготавливают притир с канавками на его наружной поверхности, создают возвратно-посту-

пательное движение заготовке и введенному в ее отверстие притиру и подают абразив на поверхность притира на его входе в отверстие заготовки, отличающееся тем, что притир берут из эластичного материала и придают ему дополнительную осевую вибрацию. При этом размер притира определяют по формуле

$$R_{\text{пр}i} - R_{zi} = g / E (1 - \mu), \quad (1)$$

где $R_{\text{пр}i}$ – размер притира в i -м направлении; R_{zi} – размер канала заготовки в i -м направлении; g – требуемое давление притира на обрабатываемую поверхность.

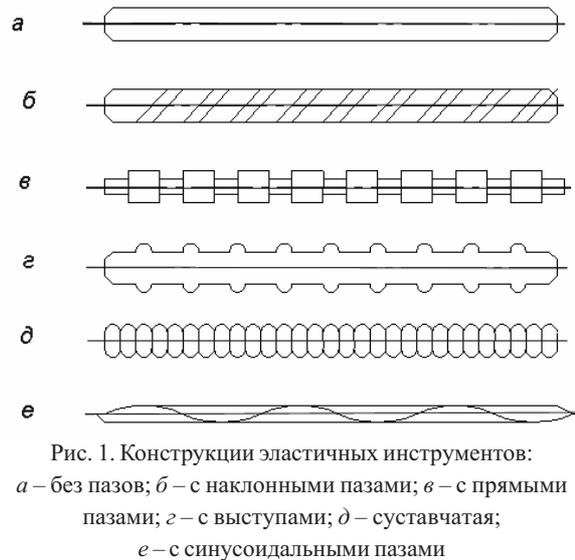


Рис. 1. Конструкции эластичных инструментов:
 а – без пазов; б – с наклонными пазами; в – с прямыми пазами; г – с выступами; д – суставчатая;
 е – с синусоидальными пазами

При обработке на инструмент передаются вибрационные колебания с заданной частотой, а заготовка совершает возвратно-поступательное перемещение вдоль инструмента.

Для притирки поверхности необходимо создать удельное давление $\approx 0,8$ Н/мм² [4]. При вводе эластичного инструмента в канал с определенным натягом возникают нормальные напряжения σ . Возникающие при перемещении инструмента касательные напряжения τ будут существенно влиять на процесс обработки при больших значениях подач $S_{\text{пр}}$.

Главные линейные деформации (относительное удлинение в направлении действия главных напряжений по осям X, Y, Z) рассчитывают по условию

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= 1/E [\sigma_1 - \mu (\sigma_2 + \sigma_3)], \\ \epsilon_2 &= 1/E [\sigma_2 - \mu (\sigma_3 + \sigma_1)], \\ \epsilon_3 &= 1/E [\sigma_3 - \mu (\sigma_1 + \sigma_2)], \end{aligned} \quad (2)$$

где $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – относительные удлинения по осям X, Y, Z соответственно; μ – коэффициент Пуансона материала; E – модуль Юнга. Для полиуретана $\mu = 0,4$; $E = 3,43$ Н/мм².

Для того чтобы получить требуемое удельное давление, необходимо создать натяг в зоне контакта «инструмент – поверхность заготовки», равный величине ϵ . Давление вызовет нормальное напряжение σ . В нашем случае $\epsilon_3 = 0$, так как продольные статические силы по оси X , приложенные к инструменту, имеют малые величины по сравнению с силами, возникающими в направлении осей Y и Z .

Схема обработки способом ЭЛХОН представлена на рис. 2. Инструмент 1 с нанесенными поперечными ка-

навками 2 закреплен на проволоочной основе 3. При введении инструмента в обрабатываемое отверстие заготовки 4 требуемое давление притира на обрабатываемую поверхность достигается за счет увеличения размера инструмента по сравнению с размером канала на величину, рассчитываемую по соотношениям

$$A_u = A (1 + R_{\text{при}} - R_{3i}),$$

$$B_u = B (1 + R_{\text{при}} - R_{3i}), \quad (3)$$

где $R_{\text{при}} - R_{3i}$ – относительная деформация инструмента в обрабатываемом отверстии; A, B – размеры прямоугольного канала; A_u, B_u – соответствующие размеры инструмента.

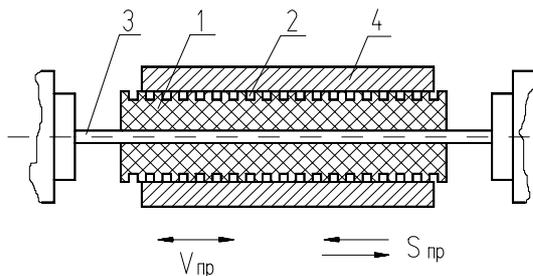


Рис. 2. Схема обработки эластичным инструментом с наложением вибраций: 1 – эластичный инструмент; 2 – абразивная паста; 3 – вило; 4 – заготовка

Основными факторами, влияющими на качество поверхностного слоя являются продолжительность процесса доводки t , величина абразивного зерна B_a , содержание его в пасте K_a , амплитуда A и частота вибрации ω притира, размеры инструмента A_u и B_u , а также скорость возвратно-поступательного движения заготовки относительно притира $S_{\text{пр}}$.

Экспериментальные работы были проведены на лабораторной установке для вибрационной обработки, созданной на базе вертикально-сверлильного станка НС-12А с устройством системы вибрации инструмента и возвратно-поступательного движения приспособления-имитатора.

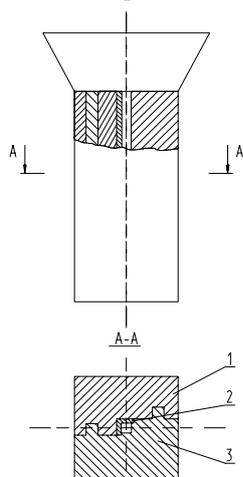


Рис. 3. Приспособление-имитатор канала в заготовке: 1, 3 – верхний и нижний корпуса; 2 – образец

Корпус приспособления состоит из обоймы с крышкой (рис. 3), между которыми зажимают съемный образец 2 в виде угольника. В сборке канал крышки 1 и образец 2 имитируют прямоугольный канал с сечением

$1,8 \times 3,6$ мм и длиной 80 мм. Площадь поперечного сечения $6,48$ мм². Величина исходной шероховатости канала волновода $R_a = 1,6 \dots 1,7$ мкм, требуемая шероховатость $R_a = 0,2 \dots 0,32$ мкм.

В прямоугольном канале волновода эластичный инструмент имеет возможность совершать колебания с амплитудой $A = 2 \dots 4$ мм и частотой вибрации $\omega = 20 \dots 30$ Гц. Волновод перемещается относительно инструмента возвратно-поступательно с постоянной скоростью $S_{\text{пр}}$. В зону обработки непрерывно подают абразивную пасту.

Притир выполнен из полиуретана на проволоочной основе с пазами по рабочей поверхности (рис. 1, б).

Для установления величины максимально возможно давления g , которое зависит от величин A_u и B_u – соответствующих размеров инструмента, были рассчитаны по соотношениям (2) и (3), изготовлены и опробованы притиры с различными размерами A_u и B_u .

Для создания удельного давления инструмента на обрабатываемую поверхность $g = 0,6$ Н/мм² изготовлен инструмент сечением $1,9 \times 3,9$ мм, для давления $g = 1,0$ Н/мм² – сечением $2,1 \times 4,3$ мм. При размерах, превышающих сечение $2,1 \times 4,3$ мм, значительно снижалась скорость $S_{\text{пр}}$, и это приводило к увеличению шероховатости поверхности при обработке.

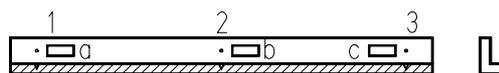


Рис. 4. Схема разметки участков для измерения параметров образца

Для доводки деталей из цветных металлов применяют электрокорунд белый. Зернистость применяемого АЗ должна быть на два порядка выше требуемой шероховатости обработанной поверхности, поэтому в экспериментах применен микрошлифпорошок – электрокорунд белый марки 23А зернистостью $B_a = 28$ мкм. В качестве носителя абразивных зерен использован ЦИАТИМ-201 ГОСТ 6267–74.

Серия предварительных экспериментов позволила определить состав абразивной пасты: электрокорунд 23А – 66 %, ЦИАТИМ-201 – 34 %. Полученное процентное соотношение соответствует рекомендуемым значениям [4] по доводке деталей из цветных металлов и сплавов. Как показали предварительные исследования, величина снимаемого слоя изменяется в большей степени с увеличением частоты колебания ω , чем величины амплитуды A . Скорость перемещения инструмента в обрабатываемой заготовке $S_{\text{пр}}$ составляла приблизительно 0,01 м/с. Лучшие значения по качеству обработанной поверхности были достигнуты при вибрации с амплитудой $A = 2$ мм и частотой $\omega = 24$ Гц.

Для установления зависимости шероховатости обработанной поверхности R_a и величины съема металла Δh от частоты вибрации ω и давления инструмента на обрабатываемую поверхность g были выполнены эксперименты с планированием по плану Коно-2³ с двумя варьируемыми факторами (ω и g). Уровни варьирования факторов приведены в табл. 1. Значения уровней выбирались таким образом, чтобы получить зависимости в предварительно выбранных областях значений факторов.

Все опыты проводились при постоянном времени обработки $t = 10$ мин. Для каждого уровня варьирования факторов было проведено шесть опытов, обобщенные результаты которых приведены в табл. 2 и 3. Измерение шероховатости проводилось на профилемере модели 253 на участках a, b, c согласно разметке по основной и боковой поверхности образцов. Величина съема материала Δh оценивалась по изменению глубины реперных точек 1, 2 и 3 (рис. 4). Для оценки равномерности обработки по длине канала проводилось измерение параметров R_a и Δh на этих же участках.

В результате математической обработки результатов экспериментов получены эмпирические зависимости шероховатости обработанной поверхности R_a (в трех зонах (a, b, c) для боковой и основной поверхности образца), величины съема металла Δh от частоты вибрации инструмента ω и величины удельного давления инструмента g на обрабатываемую поверхность (в трех реперных точках (1, 2, 3)).

Приведем некоторые эмпирические зависимости для одного из сечений:

$$R_a = 6,199 - 0,196\omega - 0,785g + 0,003\omega^2,$$

$$\Delta h = -158,88 - 0,352\omega + 183g, \quad (4)$$

$$R_a = -2,415 + 0,049\omega - 0,292g + 0,0003\omega^2,$$

$$\Delta h = -177,32 + 0,031\omega + 172,9g.$$

Остальные уравнения имеют аналогичный вид.

По анализу уравнений (4) установлено, что преобладающее влияние на шероховатость поверхности имеют как частота вибрации ω , так и удельное давление g , а на съем металла с поверхности – удельное давление g .

Обобщенные результаты опытов (для боковой и основной поверхностей) отображены на графиках рис. 5 и 6.

Анализируя полученные зависимости и опыт при обработке прямоугольных каналов, можно отметить, что выбранный состав абразивной пасты обеспечивает достаточную производительность обработки.

Требуемая величина шероховатости поверхности $R_a = 0,2$ мкм достигнута по всей длине как основной, так и боковой поверхностей при обработке с частотой вибрации инструмента $\omega = 26 \dots 28$ Гц, амплитудой вибрации $A = 2$ мм и удельном давлении притира на обрабатываемую поверхность $g = 0,8 \dots 1,0$ МПа.

Увеличение удельного давления g на обрабатываемую поверхность имеет прямую зависимость от величины натяга, с которым инструмент вводится в обрабатываемую

Таблица 1

Уровни варьирования факторов по плану Коно-2³

Уровни варьирования	Частота вибрации, X_1 (ω), Гц	Давление притира X_2 (g), МПа
Верхний, $X^{(+)}$	30	1,0
Основной, $X^{(0)}$	27	0,8
Нижний, $X^{(-)}$	24	0,6
Шаг варьирования	3	0,2

Таблица 2

Результаты измерения шероховатости R_a и глубины удаленного слоя dh по основной поверхности канала

X_1	X_2	R_a , мкм, в зонах			\bar{R}_a , мкм	dh , мкм в точках			\bar{dh} , мкм
		a	b	c		1	2	3	
-1	-1	0,26	0,26	0,24	0,25	9	9	9	9
-1	0	0,21	0,23	0,21	0,23	16	16	16	16
-1	1	0,18	0,20	0,18	0,19	24	24	24	24
0	-1	0,29	0,24	0,24	0,25	17	14	12	15
0	0	0,24	0,21	0,20	0,22	24	22	20	22
0	1	0,19	0,18	0,16	0,18	32	29	28	30
1	-1	0,30	0,27	0,27	0,28	21	21	20	21
1	0	0,25	0,24	0,24	0,24	29	28	28	28
1	1	0,21	0,21	0,21	0,21	32	36	35	36

Таблица 3

Результаты измерения шероховатости R_a и глубины удаленного слоя dh по боковой поверхности канала

X_1	X_2	R_a , мкм, в зонах:			\bar{R}_a , мкм	dh , мкм в точках			\bar{dh} , мкм
		a	b	c		1	2	3	
-1	-1	0,19	0,19	0,20	0,19	8	7	8	8
-1	0	0,18	0,19	0,18	0,18	15	14	15	15
-1	1	0,19	0,17	0,17	0,17	22	22	22	22
0	-1	0,20	0,24	0,21	0,21	14	12	15	14
0	0	0,19	0,23	0,20	0,20	21	20	21	21
0	1	0,23	0,25	0,20	0,22	21	20	21	21
1	-1	0,22	0,24	0,19	0,21	29	27	28	28
1	0	0,19	0,22	0,19	0,19	29	27	28	28
1	1	0,22	0,23	0,18	0,20	36	34	35	35

мый канал. При этом возрастает степень закрепления АЗ при обработке, так как увеличивается сила резания P_z .

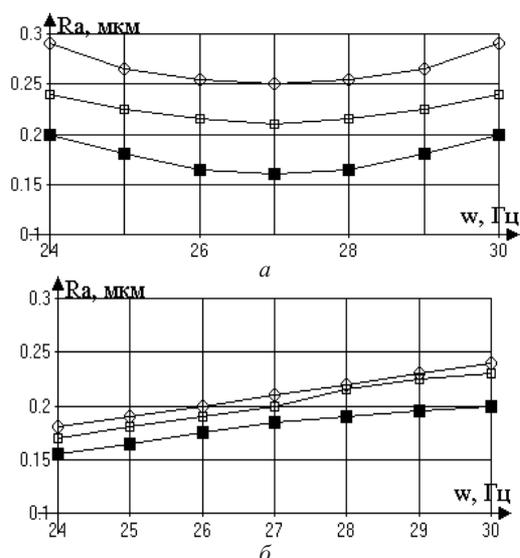


Рис. 5. Графики зависимости шероховатости поверхностей R_a по основной (а) и боковой (б) поверхностям от частоты вибрации инструмента w при удельных давлениях g , МПа

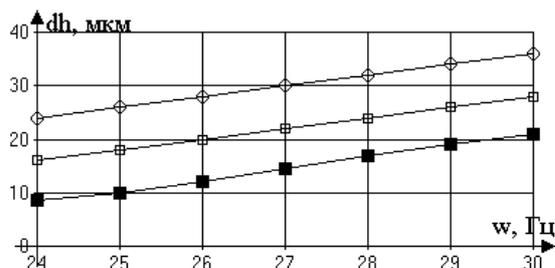


Рис. 6. Графики зависимости глубины удаленного слоя dh от частоты вибрации инструмента при удельных давлениях g , МПа

Вторая составляющая силы резания P_y зависит от скорости возвратно-поступательного движения заготовки $S_{пр}$, а также от частоты ω и амплитуды A вибрации инструмента. Скорость $S_{пр}$ невелика, и ее влияние на обработку по сравнению с влиянием наложенной вибрации мало. Возвратно-поступательное движение обеспечивает подачу абразивной пасты, наносимой в пазы инструмента, вдоль всей обрабатываемой поверхности, а также удаление продуктов обработки из канала.

Удельное давление g оказывает большее влияние на процесс доводки, чем накладываемая вибрация. Это определяет повышенные требования к точности изготовления инструмента.

Величина съема металла при обработке составила 0,02...0,03 мм, и это значительно меньше допуска на ли-

нейные размеры внутреннего прямоугольного канала (0,1 мм).

В пределах участка поверхности, где работает притир, действует единый механизм удаления материала, воспроизводится однородная шероховатость поверхности, создается определенная структура и напряженное состояние поверхностного слоя заготовки, обеспечивается постоянство формы изношенной поверхности. Чтобы добиться такой однородной поверхности по всей длине внутренней поверхности канала, следует периодически наносить новые порции абразивной пасты либо постоянно перемещать притир на новые участки обрабатываемой поверхности.

Качество поверхности формируется в основном на последних стадиях доводки. Поэтому для обеспечения высокого качества поверхностного слоя необходимо изменять зернистость абразива в процессе отделки до 3...4 мкм. Как только снимаются гребешки шероховатости поверхности (этот момент следует определить экспериментально), необходимо уменьшать как усилие прижима АЗ за счет снижения натяга эластичного инструмента, входящего в заготовку, так и величину АЗ и его твердость.

Съем металла с поверхности происходит, как правило, за счет массового микрорезания – царапания микровыступами АЗ при закреплении их в материале притира.

Предложенная конструкция инструмента работоспособна, а разработанная технология изготовления инструмента путем отливки из полиуретана с заданной точностью (0,05 мм) обеспечивает натяги для создания удельного давления на стенки заготовки при использовании метода ЭЛХОН. Разработаны рекомендации по созданию технологического процесса абразивной обработки внутренних прямоугольных каналов эластичным инструментом с наложением вибрации.

Библиографический список

1. Байгулин, А. С. Расчет, конструирование и изготовление волноводных устройств и объемных резонаторов / А. С. Байгулин. М.: ГЭИ, 1963. 320 с.
2. Хорвейт, А. Ф. Техника сверхвысоких частот / А. Ф. Хорвейт. М.: Сов. радио, 1965. С. 18–20.
3. Раховский, Р. Я. Физические основы коммутации электрического тока в вакууме / Р. Я. Раховский. М.: Наука, 1970. 276 с.
4. Орлов, П. Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки / П. Н. Орлов. Л.: Машиностроение. Ленингр. от-ние, 1988. 384 с.
5. Пат. 2039637 РФ, С1, 6 В24В. 37/02. Способ абразивной обработки отверстий / С. К. Сысоев, Д. Б. Скороделов, В. А. Левко. Опубл. 20.07.95. Бюл. № 20.

A. S. Sysoev, S. K. Sysoev, V. A. Levko, P. A. Snetkov, L. V. Zverintseva

RESEARCH OF THE PROCESS OF THE HONING STOKING UP PINELINES FOR AIRCRAFT

In clause researches of process of honing preparations with use of the elastic tool vibrating with frequency up to 30 Hz and amplitude up to 2 mm are described, and preparation has longitudinal submission concerning the tool on all to its length. The roughness of surfaces decreases with 5...7 microns up to 0,2 microns for 10 mines.

Г. Ф. Тарасов, А. И. Горбуля

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Рассматриваются вопросы влияния термической обработки инструментальных сталей на их износостойкость при низких температурах. Анализируются процессы, происходящие в зоне контакта абразива и материала в различном его структурном состоянии, определяемом режимами термической обработки. Предлагается гипотеза влияния низких температур на изменение механизма изнашивания. Рассмотрено влияние карбидной фазы инструментальных сталей на их износостойкость в условиях трения и удара по абразивной поверхности при низких температурах.

Процессы разрушения материалов абразивными частицами довольно многообразны и сложны. Механизм образования частиц износа под действием абразива зависит от многих факторов, взаимосвязанных между собой, и в том числе от схемы взаимодействия материала и абразива, свойств изнашиваемого материала, свойств абразива. В зависимости от указанных факторов на поверхности трения формируется вполне определенное сложно-напряженное состояние, которое является функцией внешних факторов и варьируется с изменением условий трения и изнашивания (например, температуры окружающей среды, которая вызывает изменение физико-механических свойств материалов и состояние абразивной поверхности). Результатом такого влияния является изменение механизма изнашивания, а следовательно, количественных и качественных показателей этого процесса, как правило в сторону снижения износостойкости. Поэтому для деталей, подвергающихся абразивному изнашиванию при низких температурах, актуальным является повышение их износостойкости.

Существует большое разнообразие способов повышения износостойкости материалов различных деталей машин [2; 3; 7]. Все эти способы можно разделить на три группы: конструктивные, технологические и комбинированные. Область применения каждого из них определяется конкретными условиями работы детали, износостойкость которой необходимо повысить.

На практике наиболее широкое применение нашли технологические способы повышения износостойкости (термическая обработка, нанесение защитных покрытий, и др.), позволяющие варьировать свойствами изнашивающихся деталей в широком диапазоне. Именно эти способы наиболее часто используются для повышения износостойкости [2; 6; 10].

Термическая обработка позволяет в широком диапазоне изменять физико-механические свойства материалов и их структуру, при которых можно получить оптимальную износостойкость материала для заданных условий изнашивания. В зависимости от вида фрикционного контакта [5], характеризующего определенный вид изнашивания (абразивное, механическое при контакте двух металлических поверхностей, окислительное, водородное, изнашивание при фреттинг-коррозии и т. д.) проводят либо поверхностную, либо объемную упрочняющую термическую обработку. Поверхностную термическую обработку можно применять для деталей сопряжений, вели-

чина износа которых соизмерима с глубиной поверхностного упрочнения (1,5...2,0 мм). Эта глубина определяется снижением содержания в мартенсите до 50 %. В основном ее проводят при изнашивании: механическом, при взаимодействии двух металлических поверхностей, при окислительном, коррозионном, водородном, эрозийном и др.

При абразивном изнашивании поверхностная термическая обработка не применяется, поскольку величины износа при нем в большинстве случаев существенно (в несколько раз) превышают величину упрочненного слоя при поверхностной термической обработке. Например, износ рабочих органов землеройных машин составляет в некоторых случаях десятки миллиметров. В связи с этим для деталей машин, подвергающихся абразивному изнашиванию, применяют только объемную термическую обработку.

Воздействие низких температур на износостойкость сталей проявляется главным образом через изменение механических свойств: твердости, прочности, вязкости и т. д. Ухудшение пластических свойств сталей при низких температурах [1] способствует переходу от вязкого разрушения материала к хрупкому, т. е. к переходу от одного механизма изнашивания материала к другому. Безусловно, это вызывает изменение интенсивности разрушения поверхности материала, контактирующей с абразивными частицами. Характер закономерностей и количественная величина интенсивности изнашивания полностью определяются механическими свойствами материала, зависящими от его структуры, и степенью влияния на эти свойства низких температур.

При низких температурах происходит изменение свойств сталей, что оказывает влияние на глубину внедрения абразивных частиц, изменение микрогеометрии их контакта с материалом и, безусловно, на количественные показатели процесса изнашивания. Степень происходящих изменений свойств сталей при понижении температуры зависит от их исходной структуры. Поэтому влияние структуры и температуры испытаний на износостойкость должны рассматриваться во взаимной связи.

В данной работе исследовалась износостойкость инструментальных сталей при их трении о закрепленные абразивные частицы (шлифовальную шкурку). Исследования проводились для инструментальных сталей, режимы термической обработки которых представлены в табл. 1.

Изнашивание образцов из исследуемых материалов производилось о закрепленные абразивные частицы

(шлифовальную шкурку), что моделирует процесс изнашивания рабочих органов машин, работающих в грунтах при низких температурах. Испытания проводились в диапазоне температур от +20 до –60 °С. Именно в этом температурном диапазоне ведется эксплуатация машин в условиях Сибири и Крайнего Севера.

В качестве эталона для определения относительной износостойкости материалов использовался алюминий-магний-свинец сплав АМг-2. Основное требование к эталону состоит в том, что он не должен изменять своих физико-механических свойств при понижении температуры до –70 °С, что подтверждается исследованиями, выполненными в данной работе. Кроме того, сплав АМг-2, ввиду неизменности его свойств, позволяет учитывать неоднородность шлифовальной шкурки и изменение ее изнашивающей способности при понижении температуры испытаний до –60 °С. Охлаждение образцов до –60 °С осуществлялось вместе со шлифовальной шкуркой.

В качестве критерия оценки и сравнения материалов по износостойкости принята относительная износостойкость, определяемая отношением износа эталона к износу испытуемого образца, с учетом плотности исследуемых материалов по формуле

$$\varepsilon = U_3 \cdot \gamma_m / U_m \cdot \gamma_3, \quad (1)$$

где ε – относительная износостойкость; U_3 и U_m – весовой износ образцов из эталонного и испытуемого материалов соответственно, мг; γ_3 и γ_m – плотность эталонного и испытуемого материалов соответственно, г/см³.

Анализ полученных результатов исследования показывает, что наибольшая износостойкость стали Х6ВФ в интервале температур испытаний от +20 до –60 °С достигается после ее закалки с температуры 1 000 °С и отпуска при 200 °С (рис. 1).

Анализ полученных результатов показывает, что во всем исследованном интервале температур наибольшая износостойкость стали Х6ВФ достигается после ее отпуска при температуре 200 °С ($t_{\text{зак}} = 1\,000\text{ °С}$) (рис. 1). Отпуск стали при температурах 200–250 °С незначительно снижает твердость стали, вследствие уменьшения степени тетрагональности решетки мартенсита и образования ε -карбида, имеющего ориентационное соответствие с мартенситом и более высокое содержание углерода. Дальнейший нагрев стали для отпуска способствует превращению ε -карбида в цементит. Кроме того, при более высоких тем-

пературах отпуска (300...400 °С) происходит коагуляция образовавшихся зерен цементита. При температуре 400 °С имеет место частичное укрупнение карбидов, что вызывает более легкое их выкрашивание под действием частиц абразива. Результатом укрупнения карбидов является неравномерность их распределения в матрице, снижение твердости и износостойкости во всем исследованном интервале температур.

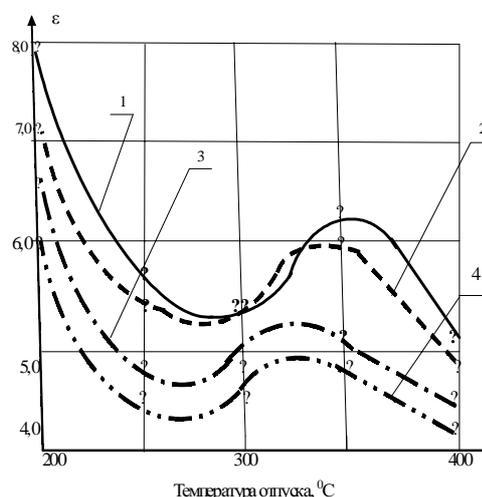


Рис. 1. Зависимость износостойкости стали Х6ВФ от температуры отпуска. Температура испытаний: 1 – +20 °С; 2 – –20 °С; 3 – –40 °С; 4 – –60 °С.

Для стали Х8М2Ф желательна термическая обработка при повышенных температурах. После закалки с температуры 1 025 °С и отпуска при 200...500 °С (рис. 2) для этой стали характерно снижение износостойкости в интервале температур закалки 200...400 °С, а затем с увеличением температуры отпуска износостойкость несколько повышается. Это связано с повышением вязкости стали при температуре ее отпуска 400...500 °С, что увеличивает долю изнашивания за счет пластического деформирования и уменьшает эту долю за счет микрорезания.

После закалки с температуры 1 125 °С и отпуска при повышенных температурах (500...600 °С) эта сталь оказалась наиболее износостойкой из всех исследованных. При одинаковой температуре отпуска (500 °С) повышение температуры нагрева под закалку с 1 025 до 1 125 °С способствует росту износостойкости на 30...40 %. Такая тенден-

Таблица 1

Основные физико-механические свойства исследованных сталей

Марка материала	Термическая обработка		Прочность при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$, МПа	Ударная вязкость $a_n \cdot 10^5$, Дж/м ²	Твердость НРС
	Закалка, °С	Отпуск, °С			
Х6ВФ	1000	200	2280	730	62
		250	2540	650	56
		300	2590	650	59
		400	2780	1030	54
Х8М2Ф	1025	200	2480	570	60
		400	3000	600	53,5
		450	2820	870	58,5
		500	2760	710	56,5
	1125	500	2080	710	56
		550	2260	450	62
		600	2870	600	58,5

ция сохраняется во всем исследованном интервале температур (+20...-60 °C) (рис. 3).

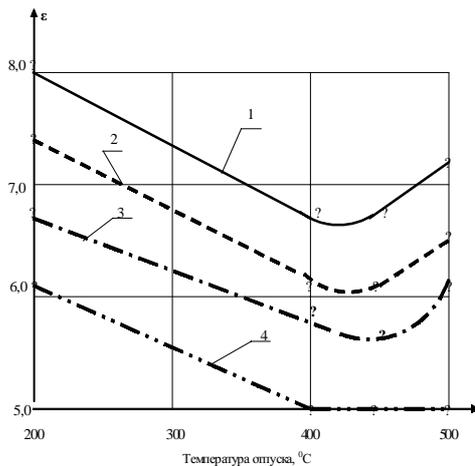


Рис. 2. Зависимость износоустойчивости стали X8M2Ф от температуры отпуска при закалке с 1 025 °C. Температура испытаний: 1 — плюс 20 °C; 2 — -200 °C; 3 — -40 °C; 4 — -60 °C.

Анализ результатов исследований показывает, что положительный эффект от повышенного нагрева стали X8M2Ф обусловлен наличием в этой стали молибдена (1,9 %), который выполняет сдерживающую роль роста зерен аустенита при нагреве под закалку и отпуск. Это позволяет повысить температуру нагрева, при которой наиболее полно происходят структурные преобразования. После закалки с температуры 1 125 °C и отпуска при температурах 550...600 °C в стали одновременно сочетаются высокая твердость (58...60 HRC), прочность ($\sigma_{изг} = 2\,260...2\,870$ МПа) и ударная вязкость ($450...600 \cdot 10^5$ Дж/м²). Структура стали, после такой термической обработки характеризуется высокой дисперсностью и равномерностью распределения карбидов в матрице.

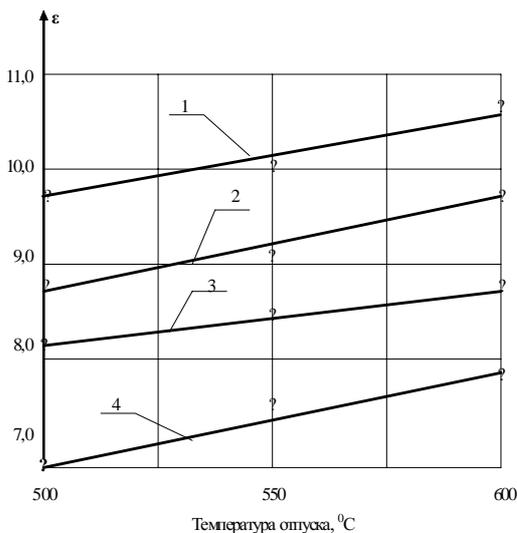


Рис. 3. Зависимость износоустойчивости стали X8M2Ф от температуры отпуска при закалке с 1 125 °C. Температура испытаний: 1 — +20 °C; 2 — -200 °C; 3 — -40 °C; 4 — -60 °C.

Роль структуры материала как одного из основных факторов, определяющего способность материала со-

противляться изнашиванию, очевидна по сопоставлению различных режимов термической обработки стали X8M2Ф, позволяющих получить одинаковые механические свойства. После отпуска при 450 °C ($t_{зак} = 1\,025$ °C) и 600 °C ($t_{зак} = 1\,125$ °C), обладая практически одинаковой твердостью (60...61 HRC), прочностью ($\sigma_{изг} = 2\,820$ и 2 870 МПа) и незначительно отличаясь по ударной вязкости ($a_n = 870 \cdot 10^5$ и $600 \cdot 10^5$ Дж/м² соответственно), различие по износоустойчивости стали X8M2Ф при указанных режимах термической обработки составляет 40...50 %. Следует заметить, что после отпуска при температуре 450 °C сталь X8M2Ф имеет несколько меньшую микротвердость (порядка 10...15 %). Это значит, что микротвердость, являясь структурным параметром, в определенной степени влияет на способность материала противостоять разрушительному воздействию частиц абразива.

Существенное влияние на износоустойчивость сталей оказывает карбидная фаза. При встрече с карбидом абразивная частица, соизмеримая с ним по твердости, утрачивает способность дальнейшего эффективного воздействия на изнашиваемую поверхность из-за ее затупления, а возможно — и частичного разрушения. Следовательно, износоустойчивость карбидосодержащих сталей должна быть выше сталей без карбидной фазы. Однако, как показали проведенные исследования, наличие карбидной фазы эффективно только в случае, когда карбиды по своему составу однородны и равномерно распределены в матрице. На величину износоустойчивости карбидосодержащих сталей существенное влияние оказывает характер динамичности взаимодействия материала и абразива. При изнашивании ударом материала по закрепленному абразиву, очень высока вероятность внецентренного удара абразивных зерен по карбидам, что ведет к выкрашиванию и вырыву карбидов из матрицы. Этот процесс сопровождается появлением дефектов в поверхностном слое в виде микротрещин или микропаковин, которые ослабляют связь с матрицей соседних карбидов. При последующих ударах эти карбиды легко выкрашиваются или вырываются. Именно поэтому при увеличении содержания карбидов в стали X8M2Ф более 11,0 % износоустойчивость при ударе об абразивную поверхность снижалась во всем исследованном интервале температур (+20...-60 °C). Кроме того, при увеличении содержания карбидов в стали X8M2Ф свыше 11,0 % характерны неоднородность их распределения в матрице и снижение вязкости стали. Увеличение содержания карбидов на 1,5 % ведет к снижению износоустойчивости при ударно-абразивном изнашивании на 20 % во всем исследованном интервале температур испытаний. При трении об абразивную поверхность из-за отсутствия динамичности взаимодействия материала и частиц абразива увеличение содержания карбидов в стали X8M2Ф до 12,5...13,0 % способствует повышению износоустойчивости во всем интервале температур испытаний от +20 до -60 °C.

Понижение температуры оказывает влияние на количественную составляющую процесса изнашивания. Так, при температуре +20 °C износоустойчивость повышается на 35...40 %, а при температуре -60 °C увеличение содержания карбидов в стали X8M2Ф до 13,0 % повышает износоустойчивость на 20...22 %. Характер закономерностей

$\varepsilon = f(K)$ (K – содержание карбидов в стали) во всем исследованном диапазоне температур испытаний одинаков.

Наряду с изложенным следует отметить, что карбиды, обладая высокой твердостью (соизмеримой с твердостью частиц абразива) снижают активность воздействия абразива на изнашиваемую поверхность. Важно оптимальное их содержание и однородное распределение в матрице.

Изменения износостойкости инструментальных сталей связаны с особенностями превращений в них при закалке и отпуске, а также с влиянием низких температур на физико-механические свойства. При охлаждении стали в процессе закалки превращение аустенита в мартенсит сопровождается появлением напряжений (структурных, фазовых, деформационных) [4]. Отпуск закаленной стали лишь частично снимает эти напряжения. Возникающие при охлаждении инструментальных сталей температурные напряжения благоприятствуют превращению аустенита в мартенсит посредством скольжения и изменения положения пластин мартенсита. Начинают проявляться дополнительные напряжения, переводящие сталь в сложно-напряженное состояние. Ухудшаются прочность и пластичность. Работа, необходимая для отделения частиц материала, в процессе изнашивания уменьшается, т. е. увеличивается интенсивность изнашивания, а значит, снижается износостойкость сталей.

Под воздействием частиц абразива в поверхностном слое материала развиваются внутренние напряжения, у вершин микротрещин происходит рост концентрации напряжений и их дальнейшее развитие. Результатом этого процесса является отделение частиц материала, а интенсивность изнашивания определяется доминирующим видом формирующегося разрушения: хрупкого или вязкого. Поэтому при абразивном изнашивании определяющую роль играют такие свойства материала, как хрупкость, вязкость и пластичность, а также их изменение при понижении температуры.

Охлаждение сталей в область низких температур ухудшает вязкость и пластичность, что вызывает переход от вязкого разрушения поверхности абразивными частицами к хрупкому. Граница этого перехода весьма условна и может характеризоваться критической скоростью распространения микротрещин и их длиной, которые всегда имеются в поверхностном слое материала, подвергающегося деформированию абразивными частицами. При хрупком разрушении резко уменьшается энергия пластической деформации, т. е. уменьшается усилие, необходимое для отделения частицы износа материала. Критическое напряжение, определяющее границу вязкого и хрупкого разрушений, зависит от величины возникающих деформаций микротрещин. С определенной степенью приближения величину критического напряжения можно определить по уравнению Гриффитса–Орована

$$\sigma = [(W_p \cdot E) / L]^{-1/2}, \quad (2)$$

где σ – критическое напряжение перехода от вязкого разрушения к хрупкому; W_p – энергия пластической деформации; E – модуль упругости материала; L – длина микротрещины в зоне деформации.

По уравнению (2) следует, что в случае одинаковых условий в зоне фрикционного контакта уменьшение W_p и уве-

личение L снижают величину критического напряжения. Это означает, что при низких температурах (при прочих равных условиях) увеличивается доля хрупкого разрушения материала, что повышает интенсивность изнашивания.

Увеличение скорости роста микротрещин в процессе пластической деформации при низких температурах отмечается и в работе [11]. В этой же работе установлено, что при понижении температуры снижается и коэффициент мгновенного роста трещин. Все изложенное способствует снижению разрушающих усилий. В локальных зонах происходит переход от среза к сколу, это уменьшает долю пластического отгеснения материала абразивными частицами.

Механизм перехода от вязкого разрушения к хрупкому авторам представляется следующим. В точках контакта абразива и материала при определенных температурно-скоростных условиях напряжения достигают критических значений, при которых образуются микротрещины. Скольжение абразивных частиц благоприятствует их продвижению и распространению в макрообъеме. Ухудшение пластических свойств и внешнее трение вызывают макролокализацию пластической деформации. Образующиеся в процессе деформации микротрещины являются своего рода концентраторами напряжений, облегчающими срез материала.

Выполненные исследования показали, что, несмотря на снижение, износостойкость инструментальных сталей в диапазоне температур +20...–60 °С остается на достаточно высоком уровне по сравнению с углеродистыми и легированными конструкционными сталями. Однако высокие хрупкость и стоимость инструментальных сталей не позволяют применять их для повышения износостойкости деталей машин путем замены материала. Поэтому в процессе исследований был разработан способ повышения износостойкости путем сочетания конструкционного и технологического принципов. Сущность способа заключается в армировании изнашивающейся поверхности детали специальными вставками, изготовленными из высокоизносостойких инструментальных сталей. Этот способ был апробирован при работе зубчатого зацепления измельчителя (дезинтегратора), предназначенного для измельчения металлической стружки и других материалов.

Рабочим органом дезинтегратора является торцовое зубчатое зацепление, которое подвергается интенсивному абразивному изнашиванию при контакте его рабочей поверхности с измельчаемым материалом, например металлической стружкой. Комплексный подход к решению трибологических задач используется и другими исследователями [9].

Исходя из особенностей работы измельчителя, а именно из-за различного числа контактов ведущего и ведомого колес зацепления с измельчаемым материалом (из-за разного числа зубьев), был предложен способ повышения их износостойкости, который позволил обеспечить не только высокую износостойкость зубчатых колес, но и их равносстойкость, т. е. одинаковую долговечность.

На ведомое зубчатое колесо по всей поверхности равномерным слоем наносится материал, обладающий высокой износостойкостью. На боковых поверхностях ведущего колеса по всей его ширине выполняются канавки

глубиной до 2 мм, которые заполняются износостойким материалом так, что он выступает над рабочей поверхностью зубчатого колеса на 0,1...0,2 мм. По сути осуществляется армирование рабочей поверхности ведущего колеса таким материалом. В качестве износостойких материалов могут применяться инструментальные стали, кобальтовые сплавы (стеллиты), карбидные сплавы на основе сормаита, металлокерамические твердые сплавы и т. д. Износостойкий материал, выступающий над рабочей поверхностью зуба, выполняет роль концентратора нагрузки, что способствует снижению давления на основной материал зубчатого колеса.

При вращении ведущее зубчатое колесо выступающими частями износостойкого материала вступает в контакт с поверхностью ведомого колеса, покрытой по всей поверхности износостойким материалом. Большая часть нагрузки, возникающей в зубчатом зацеплении, сосредотачивается на небольшой площадке контакта. Основной материал зубчатого колеса испытывает значительно меньшие усилия в зоне контакта с измельчаемым материалом, что, естественно, снижает интенсивность его изнашивания. Выступающий материал также изнашивается с меньшей интенсивностью, так как он обладает высокой сопротивляемостью к разрушению абразивными частицами. Таким образом, происходит выравнивание скоростей изнашивания износостойкого покрытия зубчатого колеса и его основного материала. Сосредоточенная в зоне контакта выступающей части износостойкого материала и рабочей поверхности зуба ведомого колеса нагрузка способствует интенсификации процесса разрушения измельчаемого материала, т. е. предлагаемый способ повышения износостойкости позволяет решить две задачи: увеличить срок службы зубчатых колес дезинтегратора и повысить его производительность.

Экспериментальная проверка этого способа показала увеличение износостойкости, а следовательно, и долговечности зубчатых колес измельчителя (дезинтегратора) в 2...3 раза. Данный способ повышения износостойкости защищен патентом РФ [8].

Таким образом, проведенные исследования показали широкий диапазон изменения износостойкости инструментальных сталей в зависимости от их структуры. Существенный вклад в изменение механических характеристик и износостойкости изученных сталей вносит карбидная фаза, которая очень чувствительна к изменению режимов термической обработки. Это дает возможность в сравнительно небольших интервалах изменения температур закалки и отпуска интенсивно воздействовать на

структуру сталей и тем самым получать свойства, обеспечивающие наибольшую износостойкость для конкретной схемы изнашивания в заданном интервале температур работы детали. Низкие температуры следует рассматривать как самостоятельный фактор снижения износостойкости исследованных сталей. Проявляется это главным образом через их воздействие на весь комплекс физико-механических свойств сталей, вызывающих усиление неоднородности пластической деформации и увеличение доли хрупкого разрушения, что способствует интенсификации процессов разрушения поверхностного слоя материала абразивными частицами.

Библиографический список

1. Вигли, Д. А. Механические свойства металлов при низких температурах / Д. А. Вигли; пер. с англ. В. Н. Геминова, под ред. Л. К. Гордиенко. М.: Мир, 1974. 374 с.
2. Виноградов, В. Н. Износостойкость сталей и сплавов: учеб. пособие / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин. М.: Нефть и газ, 1994. 415 с.
3. Гаркунов, Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. М.: Машиностроение, 1989. 327 с.
4. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. М.: Металлургия, 1968. 568 с.
5. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбаров. М.: Машиностроение, 1977. 527 с.
6. Кульков, С. Н. Трансформационно-упрочненные композиты повышенной износостойкости для узлов трения / С. Н. Кульков и др. // Трение, износ, смазка. Вып. 11. Т. 3. 2001. № 4. С. 21–25.
7. Погодаев, Л. И. Повышение надежности трибосопрежений / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин, П. П. Дудко. М.: Ягелло, 2001. 304 с.
8. Пат. № 2086837 РФ. Зубчатая передача / В. А. Курешов, Г. Ф. Тарасов, Н. В. Василенко и др. № 93049163; Заявл. 19.10.93.
9. Нахимович, Е. Комплексный подход к решению задач по повышению долговечности и износостойкости материалов и деталей машин / Е. Нахимович // Трение, износ, смазка. Вып. 19. Т. 5. 2003. № 4. С. 61–64.
10. Филиппов, М. А. Износостойкость высокоуглеродистых марганцевых метастабильных аустенитных сталей при абразивном изнашивании / М. А. Филиппов и др. // Перспективные материалы и технологии: межвуз. сб.; УГТУ – УПИ. Екатеринбург, 1998. № 1. С. 84–92.
11. Школьник, Л. М. Скорость роста трещин и живучесть металла / Л. М. Школьник. М.: Металлургия, 1973. 216 с.

G. F. Tarasov, A. I. Gorbulja

THERMAL TREATMENT OF STEELS AS THE FACTOR OF INCREASING OF THEIR WEAR RESISTANCE AT LOW TEMPERATURES

The questions of influence of thermal treatment of tool steel on their wear resistance at low temperatures are considered. The processes occurring in the zone of contact of abrasive and material, in its various structural condition, defined by the modes of thermal treatment are analyzed. It is offered the hypothesis of influence of low temperatures on change of the mechanism of wear process. It is considered the influence of carbide phase of tool steels on their wear resistance in conditions of friction and impact on an abrasive surface at low temperatures.

И. Я. Шестаков, А. И. Стрюк

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1201

Представлены результаты исследований электрохимической обработки алюминиевого сплава 1201 потенциостатическим и гальваностатическим методами. Предложен состав электролита, обеспечивающий минимальную шероховатость поверхности и равномерный съем металла по длине канала. Определен материал катода и его форма, позволяющие значительно уменьшить зону растравливания.

Для развития космической техники требуются крупногабаритные детали из материалов с особыми свойствами. Одним из таких материалов является алюминиевый сплав 1201.

Применение существующих технологий для обработки таких деталей затруднительно. Для химического фрезерования крупногабаритных деталей сборочных единиц необходимо большое количество водного раствора гидроксида натрия при температуре 80...90 °С.

Поскольку этот процесс неуправляемый, то обработку ведут периодически со сливом раствора и контролем толщины стенки. Высокая температура раствора щелочи отрицательно сказывается на окружающей среде и здоровье работающих.

Оборудования для механической обработки тонкостенных (конечная толщина 1,2 мм) крупногабаритных деталей (\varnothing 3 800 мм) в настоящее время нет. Разработка такого оборудования потребует значительных материальных ресурсов. Поэтому исследования авторов были направлены на разработку метода физико-химического управляемого снятия металла, который позволит исключить использование громоздкого оборудования.

Этому требованию соответствует электрохимическая локальная обработка. Литературных данных о механизме анодного растворения алюминиевого сплава 1201 нет. Поэтому были проведены исследования анодного растворения сплава 1201 гальваностатическим и потенциостатическим методами, для чего были спроектированы установки, позволяющие получить поляризационные кривые.

Для гальваностатического метода использовались ячейка Ландольта, которая дает возможность приблизить условия эксперимента к реальным условиям электрохимической обработки.

При гальваностатическом методе поддерживают постоянную величину поляризующего тока и регистрируют изменение потенциала. Для регистрации значений потенциала использовали вольтметр универсальный ЦЗ1. Напряжение на электроды подавали от источника питания ВСА-5К. Контроль температуры осуществлялся регистрирующим потенциометром.

Гальваностатические поляризационные кривые были сняты без компенсации омической составляющей в водных растворах солей-электролитах (рис. 1). Полученные поляризационные кривые показывают, что механизм анодного растворения сплава 1201 в электролите 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 5$ % NH_4Cl (линия 1) не отличается от механизма анодного растворения этого сплава в электролите 15 % $\text{NaNO}_3 + 5$ % NH_4Cl . В указанных электролитах растворение сплава 1201 происходит при более низ-

ких потенциалах, чем в электролитах 15 % NaNO_3 (линия 2) и 15 % $\text{NaNO}_3 + 5$ % NaOH (линия 4). Это наблюдается во всем исследуемом диапазоне плотностей тока.

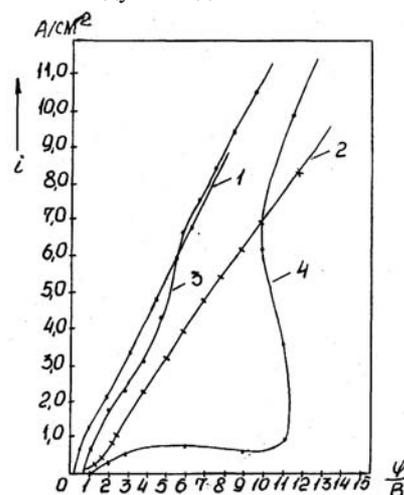


Рис 1. Гальваностатические поляризационные кривые сплава 1201: i – плотность тока; φ – электродный потенциал; электролиты: 1 – 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 5$ % NH_4Cl ; 2 – 15 % NaNO_3 ; 3 – 15 % $\text{NaNO}_3 + 5$ % NH_4Cl ; 4 – 15 % $\text{NaNO}_3 + 5$ % NaOH

Для линии 2 характерно резкое увеличение потенциала до 1,5 В при малой плотности тока 0,1 А/см². Далее характер линии подобен линиям 1 и 3, но смещен в область более высоких потенциалов, что позволяет сделать вывод о том, что введение активирующих добавок на основе ионов хлора (Cl^-) позволяет вести обработку при меньших значениях потенциалов.

Поляризационная кривая сплава 1201 в электролите 15 % $\text{NaNO}_3 + 5$ % NaOH (линия 4) значительно отличается от предыдущих кривых тем, что зона пассивного растворения сохраняется до потенциала 11,8 В и ограничивается плотностью тока 0,7 А/см². При дальнейшем увеличении плотности тока до 6...7 А/см² значение потенциала практически не меняется.

Для снятия потенциостатических поляризационных кривых использовали потенциостат ЕР20А (рис. 2).

Использование потенциостата ЕР20А позволяет получать кривые с компенсацией омической составляющей. По анализу полученных кривых следует, что растворение сплава 1201 в электролитах 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 5$ % NH_4Cl и 15 % $\text{NaNO}_3 + 5$ % NH_4Cl происходит по механизму активного растворения, что можно объяснить наличием активирующих добавок, содержащих ионы хлора. Рост потенциала в электролите 15 % NaNO_3 начинается

при меньших плотностях тока, чем в 15 % $\text{NaNO}_3 + 5\%$ NaOH .

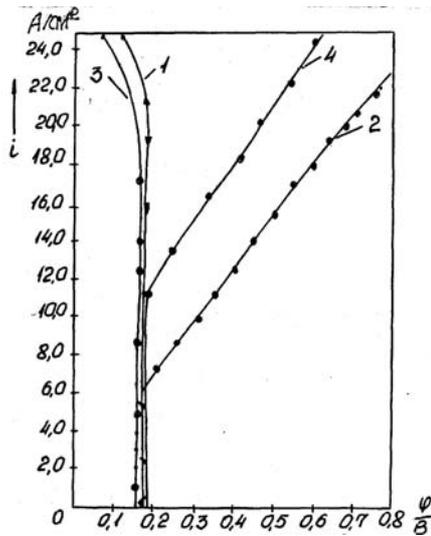


Рис. 2. Потенциостатические поляризационные кривые сплава 1201: i – плотность тока; ϕ – электродный потенциал; электролиты: 1 – 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 5\%$ NH_4Cl ; 2 – 15 % NaNO_3 ; 3 – 15 % $\text{NaNO}_3 + 5\%$ NH_4Cl ; 4 – 15 % $\text{NaNO}_3 + 5\%$ NaOH

Учитывая полученные результаты исследований, с точки зрения снижения энергозатрат процесса целесообразно рекомендовать для обработки алюминиевого сплава 1201 двухкомпонентные электролиты, содержащие 15 % NaNO_3 (или 15 % NH_4NO_3) и 5 % NH_4Cl .

Для исследования влияния режимов электрохимической обработки на шероховатость поверхности и равномерность съема металла изготовлена ячейка, позволяющая анодно растворять поверхность длиной 200 мм.

Перед началом экспериментов контролировалась исходная шероховатость каждого образца профилометром модели 283. После обработки образцы промывались, высушивались и на профилометре замерялась шероховатость в 12 точках, равноудаленных друг от друга. Затем индикаторным глубиномером замерялся съем металла в тех же 12 точках. В качестве электролита использовали растворы 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 5\%$ NH_4Cl ; 15 % $\text{NaNO}_3 + 5\%$ NH_4Cl , 15 % NaNO_3 .

Проведенными ранее экспериментами установлено, что режиму активного растворения сплава 1201 соответствуют плотности тока в диапазоне менее 0,4 A/cm^2 и более 10 A/cm^2 . Было проведено 3 серии экспериментов при плотностях тока 0,4; 10; 20 A/cm^2 .

Данные по съему металла по длине межэлектродного канала в различных электролитах приведены на рис. 4, 6, 8. С увеличением плотности тока происходит увеличение относительного съема металла на выходе из межэлектродного канала по сравнению со входом. Это может быть объяснено повышением температуры электролита на выходе из ячейки.

Результаты исследований шероховатости обработанной поверхности по длине межэлектродного канала в различных электролитах представлены на рис. 3, 5, 7. При повышении плотности тока шероховатость поверхности снижается.

На основании полученных результатов можно сделать следующий вывод: минимальную шероховатость поверхности и более равномерный съем металла по длине канала имеют образцы, обработанные в водном растворе солей 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 5\%$ NH_4Cl при плотности тока 20 A/cm^2 .

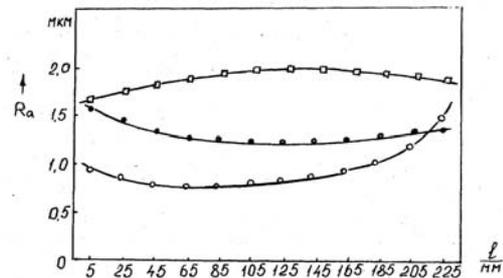


Рис. 3. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала: R_a – параметр шероховатости, мкм; l – длина канала, мм; плотность тока i : ● – 0,4 A/cm^2 ; □ – 10 A/cm^2 ; ○ – 20 A/cm^2 ; электролит 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 5\%$ NH_4Cl

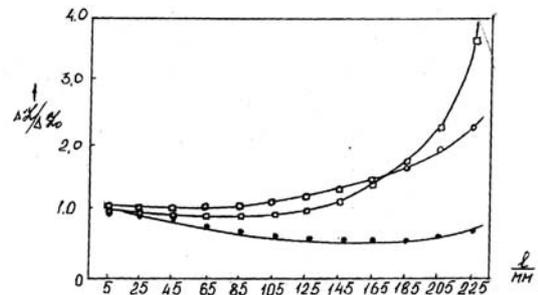


Рис. 4. Относительное изменение съема металла по длине межэлектродного канала: ΔZ_0 – съем металла в начале канала; ΔZ – текущий съем металла; плотность тока i : ● – 0,4 A/cm^2 ; □ – 10 A/cm^2 ; ○ – 20 A/cm^2 ; электролит 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 5\%$ NH_4Cl

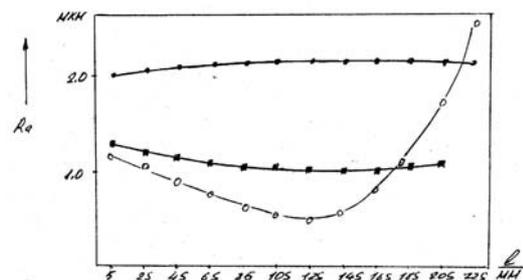


Рис. 5. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала: плотность тока i : ● – 0,4 A/cm^2 ; ■ – 10 A/cm^2 ; ○ – 20 A/cm^2 ; электролит: 15 % $\text{NaNO}_3 + 5\%$ NH_4Cl

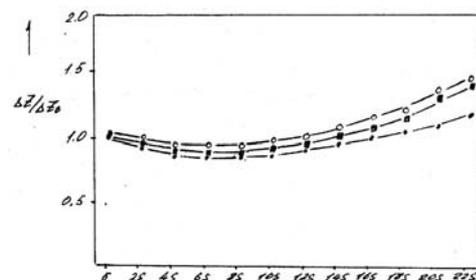


Рис. 6. Относительное изменение съема металла по длине межэлектродного канала: плотность тока i : ● – 0,4 A/cm^2 ; ■ – 10 A/cm^2 ; ○ – 20 A/cm^2 ; электролит 15 % $\text{NaNO}_3 + 5\%$ NH_4Cl

Возможна только локальная электрохимическая обработка крупногабаритных деталей, поэтому нужно знать влияние краевых эффектов на распределение шероховатости и съема металла по обрабатываемой поверхности.

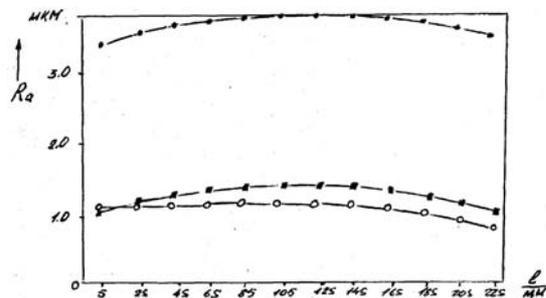


Рис. 7. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала: плотность тока i : ● – 0,4 А/см²; □ – 10 А/см²; ○ – 20 А/см²; электролит 15 % NaNO₃

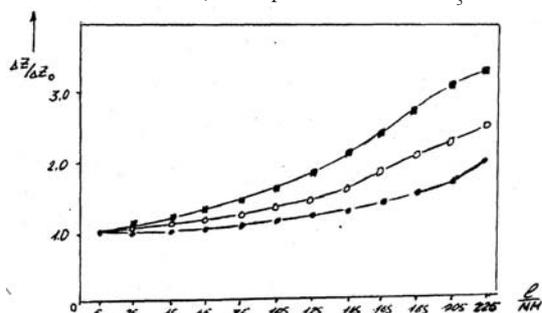


Рис. 8. Относительное изменение съема металла по длине межэлектродного канала: плотность тока i : ● – 0,4 А/см²; □ – 10 А/см²; ○ – 20 А/см²; электролит 15 % NaNO₃

Для этого было исследовано влияние формы катода, состава электролита, скорости движения потока жидкости в межэлектродном зазоре и плотности тока на вышеупомянутые показатели обработки.

Катод состоит из фторопластовой втулки 1 с запрессованной в нее медной пластиной 2 (рис. 9). Рабочая поверхность катода выполнялась плоской размерами 3×12 мм или выпуклой (3) радиусом 1,5 мм. Длинной стороной катод устанавливался перпендикулярно движению электролита в зазоре.

Эксперименты, проведенные с выпуклым катодом, показали, что с увеличением скорости потока электролита от 0,5 до 2,2 м/с шероховатость поверхности увеличивается по всей длине канала при плотностях тока от 0,4 до 27 А/см². При этом явно выражены две зоны (зоны растравливания), где параметр шероховатости R_a достигает максимальных значений (3...5 мкм). Эти зоны расположены на расстоянии 4...5 мм от точки А вправо и влево (рис. 9). Поверхность обрабатываемой детали напротив катода имеет шероховатость $R_a = 0,8...1,0$ мкм. В дальнейшем опыты проводили при скорости потока электролита 0,5 м/с.

В электрохимической размерной обработке известно, что ионы хлора оказывают отрицательное влияние на шероховатость поверхности, поэтому были проведены опыты в водном растворе 15 % NH₄NO₃. Результаты показали, что зоны растравливания сохраняются, но параметр R_a снижается до 4 мкм. Можно предположить, что из-за выпуклой формы катода происходит растекание тока по поверхности обрабатываемой поверхности, что снижает

точность обработки и шероховатость поверхности с образованием зон растравливания.

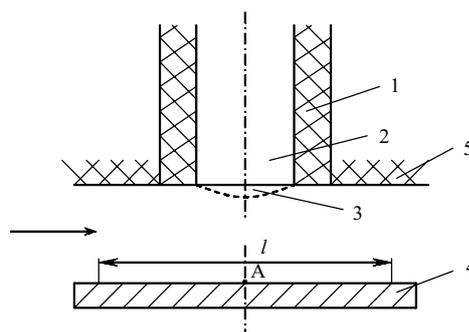


Рис. 9. Схема локальной электрохимической обработки: 1 – фторопластовая втулка; 2 – катод; 3 – выпуклая рабочая поверхность катода; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – корпус ячейки Ландольта; → – направление движения потока электролита; l – длина участка обрабатываемой детали, на которой контролировался съем металла и шероховатость поверхности, $l = 22$ мм

С целью повышения степени локализации плотности тока был применен катод, имеющий плоскую форму.

В процессе электрохимической обработки материала происходит образование большого количества шлама, который, находясь в межэлектродном канале и оседая на обрабатываемую поверхность, снижает производительность, точность обработки, ухудшает шероховатость поверхности. С целью устранения вредного влияния шлама и увеличения прорабатываемости электролита в него введен комплексообразователь 2,5 % Na₃C₆H₅O₇ (натрий лимоннокислый).

Приведенные данные по съему металла по длине межэлектродного канала с применением различных катодов (рис. 10, 11) показывают, что при электрохимической обработке плоским катодом степень локализации выше, следовательно увеличивается точность обработки.

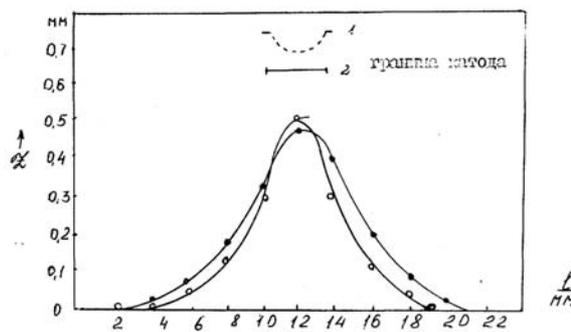


Рис. 10. Изменение съема металла по длине межэлектродного канала: электролит: ● 15 % NH₄NO₃; ○ 15 % NH₄NO₃ + 2,5 % Na₃C₆H₅O₇; катод: 1 – выпуклый; 2 – плоский; плотность тока $I = 26$ А/см²; скорость потока $v = 0,55$ м/с

На графиках изменения шероховатости по длине межэлектродного канала при различных плотностях тока (рис. 12) видно, что несмотря на более высокую локализацию обработки растравливание поверхности на входе в межэлектродный канал и на выходе из него сохраняется в диапазоне плотностей тока 7...26 А/см², а значения шероховатости в переходной зоне незначительно отличаются друг от друга.

Одним из путей повышения степени локализации обработки является использование катода с полупроводниковым покрытием. Известно, что оксид титана обладает полупроводниковыми свойствами. Это может быть использовано для повышения степени локализации обработки, что в свою очередь должно привести к снижению переходной зоны на входе в межэлектродный канал и на выходе из него. Покрытие получено путем наложения анодного потенциала на титановый электрод в водном растворе Na_2SO_4 .

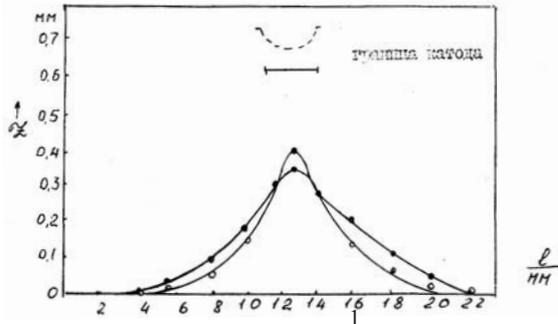


Рис. 11. Изменение съема металла по длине межэлектродного канала: электролиты: ● 15 % NH_4NO_3 ; ○ 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2,5$ % $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$; катоды: 1 – выпуклый; 2 – плоский; плотность тока $I = 14 \text{ A/cm}^2$; скорость потока $v = 0,55 \text{ м/с}$

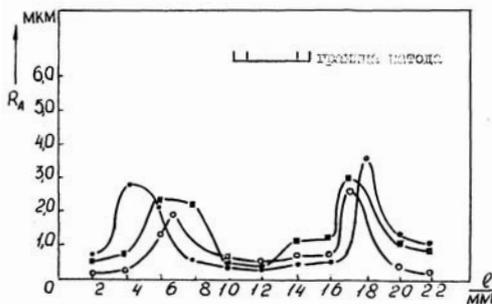


Рис. 12. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала: плотности токов: ● – $I = 26 \text{ A/cm}^2$; ■ – $i = 14 \text{ A/cm}^2$; ○ – $I = 7 \text{ A/cm}^2$; электролит 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2,5$ % $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$; скорость потока $v = 0,5 \text{ м/с}$

На графиках изменения шероховатости по длине межэлектродного канала при обработке с использованием медного и титанового катода (рис. 13) отмечено, что шероховатость поверхности обработанной титановым катодом в переходной зоне меньше и сама эта зона короче. Следовательно, именно в данном направлении нужно вести дальнейшие исследования.

По результату проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что лучшим в исследованной области является режим электрохимической обработки с плотностью тока в диапазоне $14...26 \text{ A/cm}^2$, скоростью потока электролита $0,3...0,6 \text{ м/с}$, температурой электролита

$25...30 \text{ }^\circ\text{C}$. В качестве электролита целесообразно применять водный раствор $15 \text{ } \%$ $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2,5 \text{ } \%$ $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$. Данный режим обработки дает возможность получать поверхность с хорошим качеством (R_a не более $2,5 \text{ мкм}$).

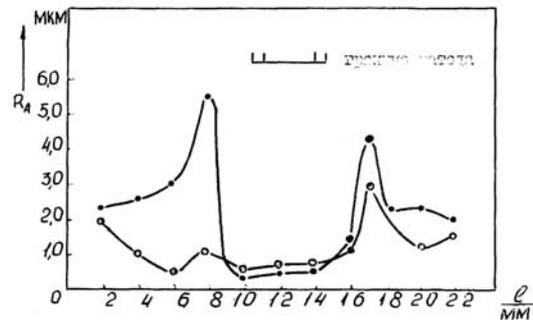


Рис. 13. Изменение шероховатости по длине межэлектродного канала: материал катода: ● – медь; ○ – титан; плотность тока $I = 3 \text{ A/cm}^2$; электролит 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2,5 \text{ } \%$ $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$

Проведенные исследования электрохимической обработки потенциостатическим и гальваностатическим методами показали, что режим активного растворения в диапазоне тока $1...24 \text{ A/cm}^2$ происходит в двухкомпонентном электролите 15 % NH_4NO_3 (или 15 % NaNO_3) и 5 % NH_4Cl . Добавка ионов хлора снижает необходимое напряжение в указанном диапазоне тока на $1,5...3 \text{ В}$.

При электрохимической обработке крупногабаритных деталей образуются межэлектродные каналы длиной 200 мм и более. Исследования обработки в таких каналах показали, что увеличение плотности тока до 20 A/cm^2 приводит к снижению шероховатости до $R_a = 0,8...1,2 \text{ мкм}$, а наилучшая равномерность съема металла достигается при плотности тока $10...20 \text{ A/cm}^2$. Исключение составляет обработка в электролите 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 5 \text{ } \%$ NH_4Cl , где лучшая равномерность достигается при плотности тока $0,4 \text{ A/cm}^2$.

Из-за больших площадей возможна только локальная, поэтому возрастает значение краевых эффектов электрохимическая обработка тонкостенных крупногабаритных деталей.

Проведенные опыты показали, что наименьшее влияние этих эффектов на равномерность съема металла и шероховатость поверхности наблюдается при использовании плоского катода, рабочая поверхность которого выполнена из диэлектрического материала. В качестве материала катода целесообразно использовать титан марки ОТ4...0, ВТ1-0. Режимы обработки: плотность тока – $14...26 \text{ A/cm}^2$, скорость потока электролита $0,3...0,6 \text{ м/с}$. В качестве электролита необходимо использовать водный раствор 15 % $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2,5 \text{ } \%$ $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ (лимонно-кислый натрий).

I. Y. Shestakov, A. I. Strjuk

ELECTROCHEMICAL PROCESSING OF AN ALUMINUM ALLOY 1201

The results of researches of electrochemical processing of an aluminum alloy 1201 potentiostat and galvanic by methods are introduced in this article. Providing of minimal roughness of a surface and uniform removal of metal by the length of canal composition of electrolyte is proposed. The material of the cathode and its form which considerably allow to reduce a zone irritated are determined.

Г. А. Щербак, И. В. Трифанов, Л. И. Трифанова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КАТОДОМ, СОВЕРШАЮЩИМ КОЛЕБАТЕЛЬНОЕ И ВИБРАЦИОННОЕ ДВИЖЕНИЯ

Приведен расчет температуры электролита и растворенной массы детали при электрохимической обработке с подвижным катодом.

Экспериментально установлено, что осуществление дискретизации процесса растворения при электрохимической обработке (ЭХО) улучшает точностные показатели [1]. В работе [2] приведена ЭХО длинномерных труб. На боковой поверхности катода нанесены полосы из изолирующего материала (фторопласта). Разрыв процедуры электрохимического растворения в рассматриваемой модели осуществляется при следующих условиях: катод неподвижен, анод вращается, анод неподвижен, катод вращается. В каждом случае любой локальный участок обрабатываемой детали то закрывается от потока электрического тока изолирующей полосой, то остается открытым для электрического потока. Длительность паузы должна быть такой, чтобы производилась полная релаксация электролита, что достигается увеличением размера изоляционных полос или изменением их количества. И этот процесс повторяется циклически.

Дискретное прерывание электрохимической обработки можно также осуществить, если обработку вести в импульсном режиме.

Высокая точность копирования достигается и за счет того, что электроду сообщается колебательное движение в направлении подачи, синхронизированное с импульсами технологического напряжения. При этом важным параметром, влияющим на точность и производительность обработки, является выбор момента подачи импульсов напряжения относительно контактирования электродов. При подаче импульса напряжения, в момент максимального зазора, величина тока сравнительно невелика, поэтому скорость растворения анода также невелика. Подача при расхождении электродов ведет к повышению плотности тока, но деталь в этом случае имеет низкую шероховатость обработанной поверхности (рябь, неравномерное растворение). Вероятно это вызвано растворением анода в условиях пониженного давления электролита в зазоре, плохим его заполнением и интенсивным закипанием. При подаче импульсов в момент сближения электродов с прекращением напряжения в момент контактирования наблюдается максимальная точность и минимальная шероховатость, что можно объяснить равномерным заполнением зазора и повышенным давлением электролита. Этот способ в практике ЭХО более предпочтителен и реализован во многих импульсно-циклических схемах.

Авторы работы [3] всесторонне изучали влияние вибрации на точность копирования и пришли к выводу, что основное влияние на точность копирования оказывает не столько импульсный ток, сколько вибрация катода-инструмента (при условии, что вибрация электрода формирует межэлектродный зазор (МЭЗ)).

Расчетная схема, рассмотренная в данной работе, представлена на рис. 1. Катод-инструмент вращается вокруг гео-

метрической оси равномерно, делая n оборотов в минуту, и совершает вибрацию вдоль этой оси с частотой f [3].

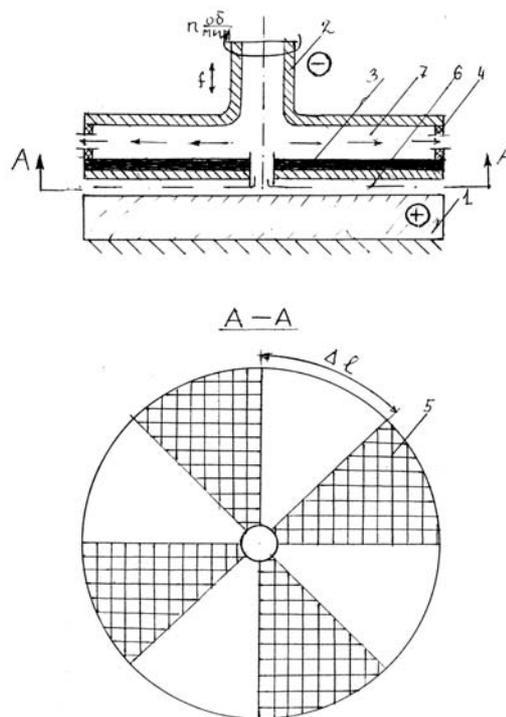


Рис. 1. Схема процесса ВЭХХ. 1 – обрабатываемая деталь; 2 – катод-инструмент; 3 – токопроводящий защитный слой; 4 – изолятор; 5 – токопроводящие абразивные сектора; 6 – межэлектродный зазор; 7 – технологический межэлектродный зазор

Предлагается следующая физическая модель процесса обработки детали в кольцевом МЭЗ:

- выделение водорода на катоде и растворение металла на аноде подчиняются закону Фарадея;
- приэлектродные зоны не оказывают существенно влияния на электропроводность электродной среды;
- газовые пузырьки равномерно распределены по кольцам постоянного радиуса и неравномерно по его длине;
- напряжение постоянно во всех точках поверхностей электродов;
- плотность тока постоянна в точках кольца постоянного радиуса и изменяется с менением положения точки на радиусе;
- электролит нагревается только от выделения Джоулева тепла.

Водород, выделяющийся на катоде, формируется в виде пузырькового клина, толщина которого растет по длине радиуса МЭЗ [4]. Разделим межэлектродное про-

странство условно на две области: 1 и 2 (рис. 2). В области 1 пузырьков мало и они небольших размеров. Поэтому эту область приблизительно можно считать жидкой фазой. Область 2 – газожидкостная, в ней количество пузырьков и их размеры быстро растут по мере удаления от центра МЭЗ.

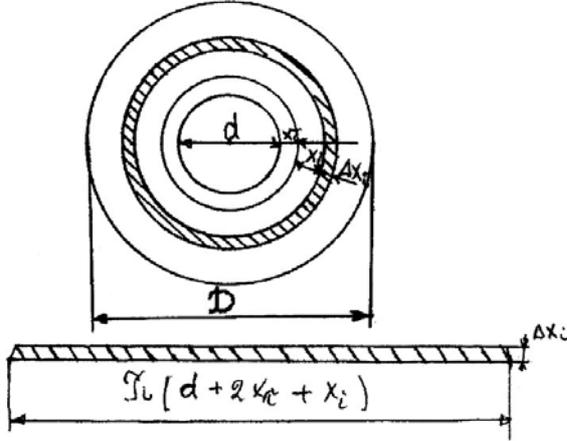


Рис. 2. Расчет области межэлектродного промежутка

Длина участка 1 должна быть не более $x_т = v \cdot \tau$, здесь v – абсолютная скорость точек электролита: $\bar{v}_{abc} = \bar{v}_{отн} + \bar{v}_{пер}$ ($\bar{v}_{отн}$ – относительная скорость, $\bar{v}_{пер}$ – переносная скорость $v_{пер} = \left(\frac{d}{2} + x\right) \cdot \omega$); так как движение равномерное, то $\omega = \frac{\pi n}{30}$. Параметр τ – время роста пузырька водорода до установившихся размеров [2],

$$\tau = \frac{\Delta w \cdot \rho_{г}}{\eta_{г} \cdot \alpha_{г} \cdot i_{cp} \cdot \Delta F}, \quad (1)$$

где Δw – объем пузырька водорода с установившимся размером; ΔF – площадь поверхности проекции пузырька на катод; $\rho_{г}$ – плотность газа; $\alpha_{г}$ – электрохимический эквивалент водорода; $\eta_{г}$ – коэффициент выхода по току водорода; i_{cp} – средняя плотность тока на участке 1.

На катодной поверхности N секторов с дугой Δl на внешней окружности покрыты токонепроводящим материалом. Поэтому в выделении тепла будет участвовать только часть площади кольца области 1. Из фигуры AOB (рис. 3) дуга Δl_x с радиусом $\frac{d}{2} + x_т$, $\Delta l_x = \frac{(d + x_т) \cdot \Delta l}{D}$;

$$S_{1n} = \pi (d + x_т) \cdot x_т; \quad S_{1изол} = \frac{(d + x_т) \cdot \Delta l \cdot x_т \cdot N}{D}.$$

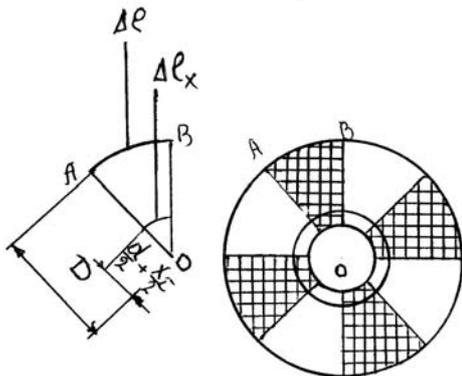


Рис. 3

Общая электроактивная площадь кольца 1 равна разности полной и токоизолированной площадей:

$$S_{1эл.акт} = S_{1n} \cdot f_1, \quad (2)$$

где

$$f_1 = 1 - \frac{\Delta l \cdot N}{\pi \cdot D} \quad (3)$$

– коэффициент уменьшения площади катода изолятора в количестве N штук.

Количество тепла, выделенное электроактивной поверхностью катода, определится по формуле Джоуля–Ленца:

$$Q_1^{жк} = 0,24(u - \Delta u) \cdot i_{cp} \cdot S_{1n} \cdot f_1 \cdot \tau, \quad (4)$$

где u – напряжение на электродах; Δu – сумма анодного и катодного потенциалов. Это тепло перешло в электролит, движущийся в МЭЗ:

$$Q_2^{жк} = w \cdot \rho_{жк} \cdot c \cdot v \cdot f_2 \cdot \Delta t \cdot \tau, \quad (5)$$

где w – объем кольца 1; $\rho_{жк}$ – плотность электролита; v – абсолютная скорость точки электролита; $\Delta t = T_т - T_0$ – разность температур на входе и выходе в область 1; f_2 – коэффициент расхода электролита, учитывающий ту часть электролита, которая участвует в переносе тепла.

Найдем объем кольца 1 по формуле

$$w = \pi (d + x_т) \cdot x_т \cdot h, \quad (6)$$

где h – усредненное межэлектродное расстояние.

Определим f_2 . К расчету коэффициента f_1 добавим, что катод вращается равномерно с n оборотами в минуту, поэтому рабочий участок сместится на величину по окружности

$$\Delta S = \frac{\pi \cdot d \cdot n \cdot \tau}{60}, \quad (7)$$

Далее получим

$$f_2 = \frac{W_{n,T}}{W_n},$$

где $W_n = \pi (d + x_т) x_т \cdot h$ – полный объем кольца 1;

$$W_{n,T} = \pi (d + x_т) x_т \cdot h - \frac{\Delta l \cdot (d + x_т) x_т \cdot h \cdot N}{D} + \frac{\pi (d + x_т) x_т \cdot n \cdot N \cdot \tau}{60}$$

– та часть объема, которая участвует в переносе тепла. Аналогично формуле (3)

$$f_2 = 1 - \frac{\Delta l \cdot N}{\pi \cdot D} + \frac{N \cdot n \cdot \tau}{60}. \quad (8)$$

Так как $Q_1^{жк} = Q_2^{жк}$, то подставляя (4) и (5), получим $\Delta t \cdot w \cdot \rho_{жк} \cdot c \cdot v \cdot f_2 \cdot \tau = 0,24(u - \Delta u) \cdot i_{cp} \cdot S_{1n} \cdot f_1 \cdot \tau$, где

$$\Delta t = \frac{0,24(u - \Delta u) \cdot i_{cp} \cdot S_{1n} \cdot f_1}{w \cdot \rho_{жк} \cdot c \cdot v \cdot f_2}, \quad (9)$$

но $\Delta t = T_т - T_0$, откуда

$$T_т = T_0 + \frac{0,24(u - \Delta u) \cdot i_{cp} \cdot S_{1n} \cdot f_1}{w \cdot \rho_{жк} \cdot c \cdot v \cdot f_2}. \quad (10)$$

Этой формуле можно придать другой вид, учитывая, что $i_{cp} = (u - \Delta u) \cdot \chi$, где $\chi = \chi_0 \cdot [1 + \beta(T_0 - T_т)]$, здесь χ, χ_0 – удельная электропроводность и удельная электропроводность электролита на входе, β – температурный коэффициент электропроводности, формула (9) примет вид

$$\Delta t = \frac{0,24(u - \Delta u)^2 \chi_0}{w \cdot \rho_{жк} \cdot c \cdot v \cdot f_2} + \frac{0,24(u - \Delta u)^2 \chi \cdot \beta}{w \cdot \rho_{жк} \cdot c \cdot v \cdot f_2} \cdot \Delta t.$$

Введя вспомогательные обозначения, получим $\Delta t = a + b \cdot \Delta t$, откуда $\Delta t = \frac{a}{1-b}$, или

$$T_{\tau} = T_0 + \frac{a}{1-b}. \quad (11)$$

Проведем аналогичный расчет температуры для газожидкостной области 2. Для этого разобьем область 2 на элементарные частички в виде концентрических колец (рис. 2). Здесь $\Delta S_{2n} = \pi(d + x_{\tau} + x_i) \cdot \Delta x_i$, $\Delta W_2 = \pi(d + x_{\tau} + x_i) \cdot h$ – элементарная площадь и элементарный объем выделенной произвольной частицы. Усредненное приращение температуры для выделенного элементарного объема

$$\Delta \bar{t} = \frac{0,24(u - \Delta u) \cdot i_{cp} \cdot \Delta S_{2n} \cdot f_1}{\Delta W_2 \cdot \rho_{г.ж} \cdot c \cdot v \cdot f_2}, \quad (12)$$

где $\rho_{г.ж} = \rho_{ж} \cdot (1 - \varphi) + \rho_{г} \cdot \varphi$ – плотность газожидкостной смеси в межэлектродном зазоре; φ – коэффициент объемного содержания газовой фазы, равен отношению объема, занимаемого газом, ко всему выделенному

объему, т. е. $\varphi = \frac{W_{г.}}{W}$. Отсюда

$$\varphi = \frac{\alpha_{г} \cdot \eta_{г} \cdot i_{cp} \cdot f}{\rho_{ж} \cdot v \cdot h_{cp}}. \quad (13)$$

Суммируя результаты (12) по всей площади кольца, получим

$$T_{x_i} = T_{\tau} + \int_{d+x_{\tau}}^{d+x_{\tau}+x_i} \frac{0,24 \cdot (u - \Delta u) \cdot i_{cp} \cdot \Delta S_{2n} \cdot f_1}{\Delta W \cdot \rho_{г.ж} \cdot c \cdot v \cdot f_2} dx. \quad (14)$$

Количество растворенной массы обрабатываемой детали в области 1, перешедшее в раствор, определится по закону Фарадея:

$$m_1 = \alpha_{мет} \cdot \eta_{мет} \cdot i_{cp} \cdot S_{1n} \cdot f_2 \cdot \tau. \quad (15)$$

Формуле (15) можно придать другой вид, учтя, что $i_{cp} = (u - \Delta u) \cdot \chi$:

$$m_1 = \eta_{мет} \cdot \alpha_{мет} \cdot (u - \Delta u) \cdot \chi_0 (1 + \beta \cdot \tau_{cp}) (d + x_{\tau}) \cdot x_{\tau} \cdot f_2 \cdot \tau, \quad (16)$$

где $\alpha_{мет}$ – электрохимический эквивалент металла детали; $\eta_{мет}$ – коэффициент выхода по току металла детали.

При вычислении растворенной массы детали в области 2 соответствующую область разбивают на элементарные частицы, масса которых определится по формуле

$$\Delta m_2 = \eta_{мет} \cdot \alpha_{мет} \cdot i_{xcp} \cdot \Delta S_{2n} \cdot f_2 \cdot \Delta x \cdot \Delta \tau. \quad (17)$$

Суммируя элементарные массы всех колец, получим

$$T_{2x} = T_{\tau} + 0,24 \cdot \int_{\tau}^{\tau_x} \int_{\frac{d}{2}+x_{\tau}}^{\frac{d}{2}+x_{\tau}+x} \frac{(u - \Delta u) \cdot i_{cp} \cdot f_1}{h \cdot \rho_{г.ж} \cdot c \cdot v \cdot f_2} d\tau dx.$$

Общая масса

$$M = m_1 + m_2. \quad (18)$$

Сравнение результатов эксперимента с расчетными значениями, полученными по формулам (14) и (18), позволяет путем варьирования параметров направлять электрохимический процесс в сторону интенсификации ЭХО. Но эксперимент показывает, что очень часто отклонение параметров от их значений для установившегося электрохимического процесса приводит к тому, что движение электролита в МЭЗ переходит в пульсационный режим, при котором в определенный момент межэлектродный канал запирается. В экстремных случаях это приводит к короткому замыканию.

Авторами работы [5] получен критерий устойчивости электрохимического процесса в удобном для практического использования виде:

$$\frac{(u - \Delta u) \cdot \chi \cdot \alpha_{H_2} \cdot R \cdot T \cdot L}{v \cdot p \cdot h^2} \leq 1, \quad (19)$$

где v – скорость электролита в МЭЗ; L – длина канала; T – температура электролита.

В работе [6] получено выражение для определения МЭЗ:

$$h_{\text{о.м.з.}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{(u - \Delta u) \cdot \chi \cdot \alpha_{H_2} \cdot R \cdot T \cdot L}{v \cdot p}}. \quad (20)$$

При варьировании параметров электрохимического процесса желателен, наряду с уравнениями (14) и (18), учитывать и уравнения (19) и (20).

Общеизвестно [4], что при сравнительно низком уровне вводимой в МЭП мощности отсутствует эффект запираения, но дальнейшее увеличение подводимой мощности приводит к появлению этого эффекта. Чем выше уровень мощности, тем быстрее этот эффект наступает. Авторами работ [7; 8] показано, что величина произведения потока мощности, вводимой в МЭП, на время его запираения в пределах ошибки эксперимента является для данного сопротивления ячейки постоянной, т. е.

$$W_{\text{max}} = I_a \cdot U \cdot t_{\text{зан}} = \text{const}, \quad (21)$$

где I_a – амплитудная плотность тока; U – напряжение; $t_{\text{зан}}$ – длительность импульса до появления срыва тока, характеризующего запираение. Изменение сопротивления лишь перераспределяет составляющие энергии. Для конкретной технологической системы максимальная энергия запираения есть постоянная величина и если ее значение изменить, то оно определяется однозначно и наоборот, т. е. изменение одного параметра системы самой системы однозначно определяется как изменение другого параметра. Это позволяет считать, что процесс ЭХО металлов является саморегулирующимся по параметрам ввода энергии.

Зависимость потока мощности, вводимой в МЭП, от времени его запираения (рис. 4) разделяет область возможных параметров импульса для импульсной ЭХО металлов на две области. Область параметров, лежащих выше ее (область 2), является запрещенной для ЭХО, так как характеризуется появлением в МЭП условий, предопределяющих развитие электрического пробоя.

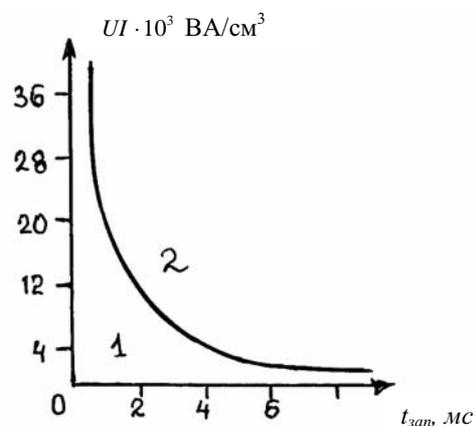


Рис. 4. Зависимость амплитудного потока мощности, вводимого в МЭП от времени запираения его для раствора хлористого натрия концентрацией 80 г/л

Исходя из вышесказанного и учитывая зависимость амплитудной плотности тока от времени запираания и вольт-амперных характеристик для разных электродных промежутков (рис. 5), необходимо отметить, что для интенсификации ЭХО процесс следует проводить в импульсном режиме при минимальной длительности импульса с максимальными значениями составляющих мощности (тока и напряжения).

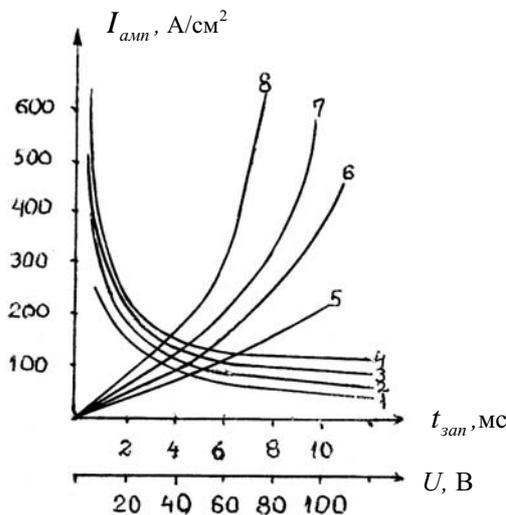


Рис. 5. Зависимость амплитудной плотности тока (1...4) от времени запираания промежутка и вольт-амперные характеристики (5...8), полученные в растворе хлористого натрия концентрацией 80 г/л при зазорах, мм: 0,8...1,5; 0,5...2,6; 0,3...3,7; и 0,2...4,8

В заключение сделаем следующие выводы:

- максимальная точность и качество поверхности при ЭХО деталей наблюдается в момент сближения электродов с прекращением подачи напряжения в момент их контактирования и последующего удаления оксидной пленки;
- существенное влияние на точность и качество поверхности деталей при ЭХО оказывает вибрация катода-инструмента при условии, когда она формирует МЭЗ;
- предложенная модель расчета параметров ЭХО при вибрации и вращении катода-инструмента позволяет

выбрать рациональные технологические параметры ЭХО;

- для интенсификации ЭХО процесс следует проводить в импульсном режиме при минимальной длительности импульса с максимальными значениями составляющих мощности (рабочего тока и напряжения).

Библиографический список

1. Рыбалко, А. В. Амплитудно-временные характеристики нарастания и спада поляризации в условиях импульсной ЭХО / А. В. Рыбалко, С. И. Галанин // Электрическая размерная обработка материалов. 1990. № 4. С. 3–7.
2. Тукманов, Г. Ш. Моделирование процесса электрохимической обработки длинномерных труб / Г. Ш. Тукманов, Г. Н. Корчагин // Электронная обработка материалов. 1979. № 5. С. 32–35.
3. Пат. №2166416 РФ. Способ электрохимического хонингования / И. В. Трифанов, Л. А. Бабкина. Заявл. 10.05.2001.
4. Петров, Ю. Н. Основы повышения точности электрохимического формообразования / Ю. Н. Петров, Г. Н. Корчагин, Г. Н. Зайдман, П. П. Саушкин. Кишинев: Штиинца, 1977. С. 151.
5. Семаков, Л. А. К вопросу колебаний двухфазного потока в длинномерном межэлектродном зазоре при ЭХРО / Л. А. Семаков, Г. Н. Корчагин // Труды КАИ. Казань, 1973. Ч. 1. Вып. 152. С. 59–65; То же. Казань, 1974. Ч. 2. Вып. 176. С. 41–45.
6. Мингазетдинов, И. Х. Исследование процесса электрохимической обработки деталей авиационных двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. Х. Мингазетдинов. Казань, 1974.
7. Рыбалко, А. В. Энергетические возможности импульсной электрохимической обработки металлов / А. В. Рыбалко, Г. Н. Зайдман // Электронная обработка материалов. 1979. № 4. С. 17–20.
8. Рыбалко, А. В. О фазовом запираании при ЭХО импульсами большой мощности / А. В. Рыбалко, Г. Н. Зайдман, Г. Р. Энгельгардт // Электронная обработка материалов. 1980. № 3. С. 25–28.

G. A. Sherbak, I. V. Trifanov, L. I. Trifanova

MODELLING OF PROCESS OF ELECTROCHEMICAL DIMENSIONAL PROCESSING BY THE CATHODE MAKING OSCILLATORY AND VIBRATING MOVEMENTS

In work calculation of temperature of electrolyte and the dissolved weight of a detail is resulted at electrochemical processing (ECP) with the mobile cathode.

С. В. Щербаков

КОМБИНИРОВАННЫЕ АДАПТИВНЫЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Излагается подход к решению задачи идентификации и математического моделирования гидрометаллургического производства цветных металлов методами непараметрической статистики и решение задачи расчета баланса цветных металлов пирометаллургического производства методом внутренних точек.

Важным этапом построения различных систем управления является построение математических моделей, описывающих процессы, происходящие в исследуемых объектах. В технологических процессах металлургии, строительной индустрии, нефтехимии и других часто возникает ситуация, когда априорные сведения о структуре модели явно не достаточны для математической постановки задачи. Существенной особенностью таких процессов являются высокая зашумленность, недостаточно развитая система контроля, непредставительность пробоотбора и т. п. Данная работа посвящена решению задачи идентификации взаимосвязанных процессов в условиях, когда параметрическая структура модели определена не полностью. В этом случае перспективным является путь построения комбинированных моделей, т. е. моделей, представляющих собой систему как параметрических, так и непараметрических моделей.

Рассмотрим общий случай задачи построения математической модели стационарного объекта в условиях частичной априорной неопределенности. Пусть объект имеет l выходных переменных $(y_1, \dots, y_l) = \bar{Y}$ и k входных $(x_1, \dots, x_k) = \bar{X}$. Векторы $\bar{X} \in \Omega(\bar{X})$ и $\bar{Y} \in \Omega(\bar{Y})$ принадлежат замкнутым, ограниченным областям в R^k, R^l соответственно. Связи между переменными \bar{X} и \bar{Y} представлены следующей системой соотношений:

$$\begin{aligned} F_j(x^j, y^j, \alpha^j) &= 0, j = \overline{1, m}, m < l \\ y_j - \varphi_j(x^j, y^j) &= 0, j = \overline{m+1, l}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x^j, y^j, j = \overline{1, l}$ – векторы, составленные из компонент векторов \bar{X} и \bar{Y} , входящих в j -е соотношение. Функции $F_j(\dots), j = \overline{1, m}$ известны с точностью до набора параметров α^j . Вид функции $\varphi_j(\dots), j = \overline{m+1, l}$ не задан, и ее параметризация затруднена. По наблюдениям $\{X[t], Y[t]\}, t = \overline{1, N}$ вектора состояний вход-выход требуется восстановить математическую модель объекта (1) и оценить выход Y при заданном значении входных переменных $x_i = \tilde{x}_i, i = \overline{1, k}$.

Такая задача была рассмотрена в работе [3], где показано, что оценка выхода при $x = \bar{X}$ по модели объекта (1) определяется условным математическим ожиданием \hat{Y} по $\varepsilon = 0$:

$$\hat{Y} = M\{Y / \varepsilon = 0\}, \quad (2)$$

где вектор $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_l)$ – вектор невязок, t -е значение которого получено по системе:

$$\begin{aligned} \varepsilon_j[t] &= F_j(x^j, y^j[t], \hat{\alpha}^j), j = \overline{1, m} \\ \varepsilon_j[t] &= y_j[t] - \varphi_j(x^j, y^j[t]), j = \overline{m+1, l}, \end{aligned} \quad (3)$$

здесь $\hat{\alpha}^j$ – оценки параметров α^j [2], $\varphi_{j_N}(\dots)$ являются статистиками:

$$\begin{aligned} \varphi_{j_N}(x^j, y^j) &= \sum_{i=1}^N y_j[i] \Phi(c_1^{-1}(N)(x^j - x^j[i])) \cdot \\ &\cdot \Phi(c_2^{-1}(N)(y^j - y^j[i])) \left(\sum_{i=1}^N \Phi(c_1^{-1}(N)(x^j - x^j[i])) \cdot \right. \\ &\cdot \left. \Phi(c_2^{-1}(N)(y^j - y^j[i])) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве оценки (2) принимается статистика

$$\begin{aligned} \hat{y}_{j_N} &= \sum_{i=1}^N y_j[i] \Phi(c^{-1}(N)(0 - \varepsilon[i])) / \\ &/ \sum_{i=1}^N \Phi(c^{-1}(N)(0 - \varepsilon[i])), j = \overline{m+1, l}, \end{aligned} \quad (5)$$

являющаяся непараметрической оценкой кривой регрессии (2). Оценка (5) является асимптотически несмещенной и состоятельной оценкой корня систем уравнений [3]

$$\begin{aligned} F_j(x^j, y^j, \hat{\alpha}^j) &= 0, j = \overline{1, l} \\ y_j - \varphi_{j_N}(x^j, y^j) &= 0, j = \overline{m+1, l}, \end{aligned} \quad (6)$$

которая является моделью объекта (1). Заметим, что математическое описание технологических переделов гидрометаллургического производства (ГМП) точно совпадает с системой (1). Таким образом, для получения оценки выхода П1, ..., П5 последовательно применяется алгоритм (3), (4), (5). Вопросы выбора функций $\Phi(\dots)$ и коэффициентов $c_1(N), c_2(N)$ в (4), (5) опускаем, они достаточно подробно представлены в [4].

Изложенная теория применялась при разработке адаптивной математической модели ГМП. Получение технической серы и сульфидного медно-никелевого концентрата путем переработки исходного сырья – очищенного пирротинового концентрата – является непрерывным многоэтапным и многокомпонентным процессом, включающим следующие переделы: автоклавное выщелачивание (П1), осаждение (П2), серосульфидную флотацию (П3), дезинтеграцию и серную флотацию (П4), выплавку серы (П5).

Передел П1. Введем некоторые обозначения:

– $X_{14} = (x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14})$ – вектор входных переменных, где $x_{1i}, i = \overline{1, 4}$ – количество никеля, меди, железа и серы в пирротинном концентрате, поступающем на переработку;

– $Y_1 = (y_{11}, y_{12}, \dots, y_{19}, y_{110})$ – вектор выходных переменных, где y_{11} – количество твердого в пульпе после выщелачивания (ПВ); y_{12} – объем жидкого в ПВ, $y_{12i+1}, y_{12i+2}, i = \overline{1, 4}$ – содержание никеля, меди, железа и серы в твердом и жидком ПВ соответственно. В принятых обозначениях передел П1 может быть описан следующим образом:

$$\begin{aligned} y_{11} y_{12i+1} + y_{12} y_{12i+2} - x_{1i} &= 0, i = \overline{1, 4}, \\ \alpha_1 y_{11} - y_{12} &= 0, \\ y_{12i+2} - f_{1i}(x_{1i}, y_{12i+1}) &= 0, i = \overline{1, 4}, \end{aligned} \quad (7)$$

где неизвестные статистические зависимости $f_i(\dots), i = \overline{1,4}$ представлены выборками наблюдений $\{y_{1_{2i+1}}, y_{1_{2i+2}}, x_{1i}\}_t, i = \overline{1,4}, t = \overline{1, N}$ (N – объем выборки), снятыми в режиме нормальной работы П1.

Передел П2. Входными воздействиями данного передела X_2 являются выходные переменные П1, т. е.

$$\overline{X}_2 = (x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}) = (\dots, y_{11} \cdot y_{1_{2i+1}} + y_{12} \cdot y_{1_{2i+2}}, \dots), i = \overline{1,4}. \quad (8)$$

Введем вектор выхода П2:

$$\overline{Y}_2 = (y_{21}, y_{22}, \dots, y_{29}, y_{2_{10}}),$$

где y_{21} – количество твердого в пульпе после осаждения (ПО); y_{22} – объем жидкого в пульпе ПО; $y_{2_{2i+1}}, y_{2_{2i+2}}, i = \overline{1,4}$ – содержание никеля, меди, железа и серы в твердом и жидком ПО соответственно. Тогда П2 описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} y_{21} \cdot y_{2_{2i+1}} + y_{22} \cdot y_{2_{2i+2}} - \beta_1 x_{1i} - x_{2i} &= 0, i = \overline{1,4}, \\ \alpha_2 y_{21} - y_{22} &= 0, \\ y_{21} - y_{11} - \beta_3 x_{1i} &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_4 = 0,$$

$$y_{2_{2i+2}} - f_{2i}(y_{2_{2i+1}}) = 0, i = \overline{1,4}.$$

Зависимости $f_{2i}(\dots)$ неизвестны, но представлены выборками $\{y_{2_{2i+1}}, y_{2_{2i+2}}\}_t, i = \overline{1,4}, t = \overline{1, N}$.

Передел П3. Здесь соотношение между входными переменными данного передела и выходными предыдущего передела П2 аналогичны (8):

$$\overline{Y}_3 = (y_{31}, y_{32}, \dots, y_{3_{19}}, y_{3_{20}}),$$

y_{31} – количество твердого серосульфидного концентрата; y_{32} – объем раствора серосульфидного концентрата; $y_{3_{2i+1}}, y_{3_{2i+2}}, i = \overline{1,4}$ – содержание никеля, меди, железа и серы в твердом и растворе серосульфидного концентрата соответственно; $y_{3_{11}}$ – количество твердого хвостов серосульфидной флотации; $y_{3_{12}}$ – объем раствора хвостов серосульфидной флотации; $y_{3_{2i+1}}, y_{3_{2i+2}}, i = \overline{6,9}$ – содержание никеля, меди, железа и серы в твердом и растворе хвостов серосульфидной флотации.

Тогда система П3 описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} y_{31} \cdot y_{3_{2i+1}} + y_{32} \cdot y_{3_{2i+2}} + y_{3_{11}} \cdot y_{3_{2(i+5)+1}} + y_{3_{12}} \cdot y_{3_{2(i+5)+2}} - x_{3i} &= 0, i = \overline{1,4}, \\ \alpha_3 y_{31} - y_{32} &= 0, \\ \gamma_3 y_{3_{11}} - y_{3_{12}} &= 0, \\ y_{31} (y_{3_{2i+1}} - y_{3_{2(i+5)+1}}) - y_{21} (y_{2_{2i+1}} - y_{2_{2(i+5)+2}}) &= 0, i = \overline{1,4}, \\ y_{31} + y_{3_{11}} - y_{21} &= 0, \\ y_{3_{12}} y_{3_{16}} - y_{22} y_{2_6} &= 0, \\ y_{3_{11}} (y_{3_{2i+1}} - y_{3_{2(i+5)+1}}) - y_{21} (y_{2_{2i+1}} - y_{2_{2i+1}}) &= 0, i = \overline{1,4}, \\ y_{34} &= f_{31}(y_{33} + y_{35}), \\ y_{32} &= f_{32}(y_{35}), \\ y_{3_{13}} + y_{3_{15}} - f_{33}(y_{33} + y_{35}) &= 0, \\ y_{38} - f_{34}(y_{3_{17}} + y_{3_{18}}) &= 0, \\ y_{3_{10}} - f_{35}(y_{3_{20}}) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

В системе (10) зависимости $f_{3i}(\dots)$ неизвестны, но заданы выборками наблюдений

$$\{y_{3_{2i+1}}, y_{3_{2i+2}}, \dots, y_{3_{2(i+5)+1}}, y_{3_{2(i+5)+2}}\}_t, i = \overline{1,4}, t = \overline{1, N}.$$

Передел П4. Под вектором входных переменных данного передела будем понимать вектор

$$\overline{X}_4 = (\dots, x_{4i}, \dots) = (\dots, y_{31} \cdot y_{3_{2i+1}} + y_{32} \cdot y_{3_{2i+2}}, \dots), i = \overline{1,4}.$$

Обозначим вектор выходных переменных $\overline{Y}_4 = (y_{41}, \dots, y_{4_{10}}, \dots, y_{4_{19}})$, где y_{41} – количество сульфидного концентрата; y_{42} – количество серного концентрата; $y_{4_{11}}$ – количество хвостов выплавки серы; $y_{4_{12}}$ – количество технической серы; $y_{4_{2i+1}}, y_{4_{2i+2}}, i = \overline{1,4}$ – содержание никеля, меди, железа и серы в сульфидном и серном концентратах соответственно; $y_{4_{2(i+5)+1}}, i = \overline{1,4}$ – содержание никеля, меди, железа и серы в хвостах выплавки серы.

Имеем систему уравнений:

$$\begin{aligned} y_{41} \cdot y_{4_{2i+1}} - x_{4i} - x_{4i} x_{4i} &= 0, i = \overline{1,4}, \\ \alpha_{4i} &= 0, i = \overline{1,3}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$y_{42} \cdot y_{4_{2i+2}} - y_{4_{11}} \cdot y_{4_{2(i+5)+1}} = 0, i = \overline{1,4}.$$

Передел П5. Поскольку передел П4 технологически связан с переделом выплавки серы П5 посредством появления оборотного продукта – хвостов выплавки серы, то к (11) необходимо добавить описание П5 и в дальнейшем рассматривать систему совместно. Такими уравнениями являются

$$\begin{aligned} y_{42} \cdot y_{4_{10}} \alpha_5 - y_{4_{12}} &= 0, \\ y_{42} + y_{4_{11}} - y_{4_{12}} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Отметим, что некоторые показатели по полупродуктам и готовой продукции ГМП, которые незначительно изменяются в допустимых границах требований технологии, называются стандартами предприятия и задаются априори. Последними являются

$$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_3, \gamma_3, \alpha_4, y_{3_{14}}, y_{3_{15}}, \alpha_5.$$

На основании известных стандартов предприятия, входных переменных и выборок статистических наблюдений за качественными показателями металлосодежащих материалов по переделам необходимо определить с помощью соотношений (7)–(12) основные технологические показатели процесса получения сульфидного медно-никелевого концентрата и технической серы. Вопросы непараметрической оценки кривых регрессии (при определении зависимостей f_{ki} , где k – номер передела) подробно рассмотрены в работах [1...4].

При этом определены размерности векторов: входных переменных – 29; выходных переменных – 56; количество известных уравнений системы (балансы металлов на переделах) – 39; количество непараметрических уравнений – 17.

В основе пирометаллургической технологии лежит последовательно-параллельная, с рециклами схема переработки металлосодежащих материалов с целью получения никелевого фанштейна, анодной меди и серы технической. Условно производство можно разделить на медную и никелевую линии, которые в свою очередь делятся на следующие переделы:

- 1) печи взвешенной плавки медной линии (ПВП-СU);
- 2) печи взвешенной плавки никелевой линии (ПВП-NI);
- 3) обединительные электропечи (ОЭП);
- 4) конвертирование медной линии (КОН-СU);
- 5) конвертирование никелевой линии (КОН-NI);
- 6) анодная плавка (АП).

На ПВП-СУ поступает на переработку медный концентрат, обороты и пыль, полученная на КОН-СУ. В процессе плавки с добавлением кварцевого песка получают штейн и шлак.

На КОН-СУ перерабатывается штейн ПВП-СУ, скрап медный и шлак АП, в качестве флюса добавляется песчаник. Результатом работы являются черновая медь, конвертерный шлак, пыль, обороты и сухой свернутый никелевый шлак.

На АП из черновой меди получают анодную медь – товарный продукт медной линии и анодный шлак.

ПВП-НИ работает аналогично ПВП-СУ, но перерабатывает смесь никелевого и сульфидного концентратов вместо медного.

На ОЭП перерабатывается тяжелая фракция, шлаки ПВП и КОН обеих линий, обороты, в качестве флюса используется песчаник. Результатом работы являются штейн и гранулированный отвальный шлак – конечный продукт пирометаллургического производства (ПМП).

На КОН-НИ поступают на переработку штейны никелевой линии и часть штейна ПВП-СУ, сухой свернутый никелевый шлак, обороты из остатка и песчаник. Результатом работы являются фанштейн – товарный продукт никелевой линии, а также шлак, пыль, обороты.

Решение задачи прогноза промежуточных и выходных продуктов ПМП при заданном входе, полученное в результате реализации построенной модели, должно удовлетворять балансовым соотношениям по цветным металлам, сере, железу и кремневке, технологическим зависимостям, обнаруженным в результате анализа статистической информации, условиям кондиционности некоторых продуктов. Кроме того, физические веса продуктов должны быть неотрицательными, а содержание элементов в продуктах должно лежать в допустимых технологических диапазонах.

Формализуя эти условия, будем иметь ограничения на решение, получаемое по модели, причем первые три условия будут в виде равенств, последние – в виде неравенств. Для этого необходимо выбрать способ задания переменных. В качестве переменных выберем физические веса элементов в продуктах в тоннах там, где общий физический вес продукта неизвестен, в противном случае (только для оборотов) неизвестными будут содержания. Этот способ позволяет задать балансовые соотношения в виде линейных уравнений, а ограничения на переменные – в виде нелинейных отношений (дробей). Существует стандартный прием введения так называемых фиктивных переменных и дополнительных уравнений, с помощью которых нелинейности такого рода приводятся к линейному виду. Таким образом, несколько увеличив размерность, получим линейную модель.

Необходимо отметить, что балансовыми соотношениями являются уравнения, в левой части которых приводится сумма цветных металлов во всех входных продуктах технологической операции, а в правой части – сумма цветных металлов во всех выходных продуктах с учетом потерь.

Для определения количества и рационального состава промежуточных и конечных продуктов ПМП при заданном количестве и качестве (Cu, Ni, Co, Fe, S) никелевого и медного концентратов и некоторых стандартов пред-

приятия необходимо решить следующую задачу по расчету баланса металлов: найти \bar{X} такой, что $A\bar{X} = B$, при ограничениях $\bar{C} < \bar{X} < \bar{D}$, где A – матрица системы размером $m \times n$, причем $m < n$; \bar{X} – вектор неизвестных переменных задачи и начальное приближение итерационной процедуры длины n (в нашем случае это количество цветных металлов в промежуточных и конечных продуктах ПМП); \bar{C} – вектор ограничений снизу длины n ; \bar{D} – вектор ограничений сверху длины n ; B – вектор правых частей длины m .

В дальнейшем нам понадобятся следующие величины: \bar{E} – вектор невязок длины m , $\bar{E} = A\bar{X} - B$; \bar{S} – вектор спуска длины n ; \bar{Y} – новое приближение итерационной процедуры длины n ; Q – диагональная матрица квадратов расстояний до ближайших границ размером $n \times n$; \bar{U} – вектор двойственных переменных длины m .

Кроме этого, квадратные скобки будут означать скалярное произведение, а звездочка справа сверху от матрицы – ее транспонирование. Точки, удовлетворяющие ограничениям типа неравенств, будем называть допустимыми. Очевидно, что множество решений этой задачи может быть как бесконечным, так и пустым, в зависимости от конкретных значений A, B, \bar{C}, \bar{D} . В первом случае нас устроит любое из допустимых решений, во втором – под решением будем понимать такой допустимый вектор \bar{X} , который минимизирует невязку в среднеквадратическом смысле. Итерационная процедура поиска решения состоит из следующих этапов:

1. Выбор начального приближения из допустимой области.
2. Поиск направления спуска, уменьшающего невязку. Как известно, кратчайшим из всех таких направлений является перпендикуляр, его мы и будем искать, но чтобы учесть ограничения типа неравенств, на каждом шаге итерационного процесса будем менять метрику пространства таким образом, чтобы расстояния от начальной точки до всех ближайших границ были равны единице.
3. Выбор длины шага. Она должна быть не так велика, чтобы новое приближение не вышло из допустимой области, но и не слишком мала, чтобы существенно не увеличивать число итераций.
4. Для остановки процесса используют два условия: первое – норма невязки стала меньше ранее заданной малой величины (допустим, 1 кг), т. е. решение получено; второе – длина шага стремится к нулю, т. е. решение находится за границей допустимой области.

Выбор начального приближения не представляет трудностей. Если нет никаких априорных сведений о решении, то можно взять среднюю величину, $\bar{X} = 0.5(\bar{C} + \bar{D})$.

Целью расчетов балансов металлов является минимизация невязок количества металлов по входным и выходным продуктам. В связи с этим направление спуска \bar{S} ищется как решение следующей задачи квадратичного программирования:

$$\text{Min} 0.5[\bar{S}, Q^{-1} \bar{S}], \text{ при } A\bar{S} = \bar{E}.$$

Функция Лагранжа для этой задачи имеет следующий вид:

$$\Phi(\bar{S}, \bar{U}) = 0.5[\bar{S}, Q^{-1} \bar{S}] - [\bar{U}, A\bar{S} - \bar{E}].$$

Приравняв частные производные по \bar{S} и \bar{U} к нулю, получим систему уравнений для определения седловой точки:

$$\begin{aligned} \bar{S} &= Q A^* \bar{U} \\ A \bar{S} &= \bar{E}. \end{aligned}$$

Легко видеть, что

$$A \bar{Y} - \bar{B} = A(\bar{X} - \lambda \bar{S}) - \bar{B} = \bar{E}(1 - \lambda),$$

т. е. движение в вычисленном направлении \bar{S} обеспечивает покомпонентное уменьшение невязки обратно пропорционально выбранной длине шага λ , которая вычисляется следующим образом:

$$\lambda = \min(1, \max(\rho, \varphi)),$$

где ρ – расстояние до границы допустимой области; ρ – величина из интервала (0,5, 1) на усмотрение лица, принимающего решение (ЛПР); φ – расстояние до границы эллипсоида, вписанного в параллелепипед, определяемый ограничениями типа неравенств с центром в точке \bar{X} ,

$$\varphi^{-2} = [Q A^* \bar{U}, A^* \bar{U}].$$

Окончательный порядок вычислений таков:

1. Находим начальное приближение $\bar{X} = 0,5(\bar{C} + \bar{D})$.
2. Определяем вектор невязок $\bar{E} = A\bar{X} - \bar{B}$, проверяем условия.
3. Получаем матрицу Q с элементами $q_{jj} = (\min(x_j - c_j, d_j - x_j))^2, j = \overline{1, n}$.
4. Ищем двойственные переменные $\bar{U} = (A Q A^*)^{-1} \bar{E}$.
5. Находим вектор спуска $\bar{S} = Q A^* \bar{U}$.

6. Определяем длину шага $\lambda = \min(1, \max(\rho, \varphi))$, проверяем условие.

7. Получаем новое приближение $\bar{Y} = \bar{X} - \lambda \bar{S}$.

8. Новое приближение принимаем за начальное и возвращаемся к п. 2.

На основе изложенных подходов были разработаны комбинированные адаптивные модели технологических процессов Надеждинского металлургического завода Норильского горно-металлургического комбината.

Библиографический список

1. Применение ЭВМ для управления производственным комплексом с непрерывным характером производственного процесса / В. И. Волков, А. В. Медведев, С. В. Щербаков и др. // Применение ЭВМ в задачах управления: сб. тр. ВЦ СО АН СССР. Красноярск, 1985.
2. Цыпкин, Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я. З. Цыпкин. М.: Наука, 1968.
3. Красноштанов, А. П. Комбинированные многосвязные системы / А. П. Красноштанов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2001.
4. Медведев, А. В. Актуальные проблемы автоматизации, прикладной математики и механики / А. В. Медведев // Информатика. Элементы теории непараметрических систем управления. Ч. 3 / СО РАН. Новосибирск; Красноярск, 1996. С. 87–112.

S. V. Shcherbakov

THE COMBINED ADAPTIVE MODELS OF THE INTERCONNECTED TECHNOLOGICAL PROCESSES

In clause the approach to the decision of a task of identification and mathematical modeling of hydrometallurgical manufacture of color metals by methods of nonparametric statistics and decision of a task of balance account of color metals pirometallurgical manufacture by a method of internal points is stated.

**ДИССЕРТАЦИОННЫЕ СОВЕТЫ
СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М. Ф. РЕШЕТНЕВА**

ДС 212.023.01 – защита докторских и кандидатских диссертаций (с грифом «совершенно секретно» и «секретно» по специальностям:

05.02.08 – Технология машиностроения (по техническим наукам)

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (по техническим наукам)

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (по техническим наукам)

Председатель – д-р техн. наук, профессор Козлов Альберт Гаврилович

Зам. председателя – д-р техн. наук, профессор Ловчиков Анатолий Николаевич

Ученый секретарь – д-р техн. наук, профессор Михеев Анатолий Егорович

ДМ 212.249.01 – защита докторских и кандидатских диссертаций по специальностям:

09.00.01 – Онтология и теория познания (по философским наукам)

09.00.08 – Философия науки и техники (по философским наукам)

09.00.11 – Социальная философия (по философским наукам)

Председатель – д-р филос. наук, профессор Чуринов Николай Мефодьевич

Зам. председателя – д-р филос. наук, доцент Калашников Владимир Дмитриевич

Ученый секретарь – канд. филос. наук, доцент Мельникова Татьяна Витальевна

Д 212.249.02 – защита докторских и кандидатских диссертаций по специальностям:

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая) (по техническим и физико-математическим наукам)

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность) (по техническим наукам)

Председатель – д-р физ.-мат. наук, профессор Сенашов Сергей Иванович

Зам. председателя – д-р техн. наук, профессор Антамошкин Александр Николаевич

Зам. председателя – д-р техн. наук, профессор Лаптенко Валерий Дмитриевич

Ученый секретарь – д-р техн. наук, профессор Ковалев Игорь Владимирович

Срок полномочий совета до 31 декабря 2006 г.

Д 212.249.03 – защита докторских и кандидатских диссертаций по специальности:

08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством:

– экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами промышленности;

– управление инновациями и инвестиционной деятельностью;

– региональная экономика;

– сфера услуг (по экономическим наукам)

Председатель – д-р экон. наук, профессор Беляков Геннадий Павлович

Зам. председателя – д-р экон. наук, профессор Сангадиев Зандра Гэндэнович

Ученый секретарь – канд. экон. наук, доцент Сангадиева Ираида Гомбоевна

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ПРОГНОЗОВ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Рассматриваются проблемы, возникающие в ходе формирования прогнозов социально-экономического развития муниципальных образований, приводятся возможные методы прогнозирования.

Прогнозы социально-экономического развития Российской Федерации, субъектов Российской Федерации, муниципальных образований и отраслей экономики, составление которых вместе со сводными финансовыми балансами предшествует формированию проектов бюджетов всех уровней (ст. 169, 172, 173, 175 Бюджетного кодекса Российской Федерации), являются основополагающими, базовыми элементами в системе общегосударственного управления. Правовой основой использования методов прогнозирования в управлении социально-экономическим развитием Российской Федерации, в том числе и территориальным развитием, является федеральный закон «О государственном прогнозировании и программах социально-экономического развития Российской Федерации».

В соответствии с Бюджетным кодексом (БК) Российской Федерации (ст. 172), составление бюджета основывается, наряду с другими документами, на прогнозе социально-экономического развития и плане развития государственного или муниципального сектора экономики соответствующей территории на очередной финансовый год. В свою очередь, как это следует из ст. 173 БК, прогноз социально-экономического развития территории разрабатывается на основе данных социально-экономического развития за последний отчетный период, прогноза социально-экономического развития территории до конца базового года и тенденций развития экономики и социальной сферы на планируемый финансовый год и предшествует составлению проекта бюджета.

В существующей системе подготовки прогнозов социально-экономического развития муниципального уровня оказался в трудном положении. Для разработки региональных прогнозов местные органы власти должны предоставлять органам власти субъектов Российской Федерации данные и сведения экономического, социального, финансово-бюджетного содержания не только по предприятиям муниципальной собственности, но и по всем хозяйствующим субъектам, находящимся на территории муниципального образования. При этом необходимо учитывать, что отчетные и оценочные показатели муниципального уровня серьезно отличаются от региональных показателей по степени обобщения, методикам и методологии разработки. Кроме того, не все показатели могут быть представлены в силу того, что на местном уровне ряд показателей не рассчитывается вообще (валовой региональный продукт, индексы-дефляторы и др.), а получение других показателей органами местного самоуправления на безвозмездной основе регламентируется ежегодно утверждаемой Федеральной программой статистических работ. Информационное обеспечение показателей, которые выходят за рамки этой программы, осу-

ществляется на договорной основе, что в большинстве случаев непосильно для местных бюджетов.

Предоставление статистической информации для разработки прогнозов имеет обязательный характер только для органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, вопрос же обеспечения информацией муниципальных органов остается открытым.

Еще одной серьезной проблемой значительной части муниципальных образований является отсутствие прогнозных проработок социально-экономического развития, как краткосрочных, так и долгосрочных, не говоря уже о подготовке нескольких вариантов прогноза. Препятствием при подготовке прогнозов на муниципальном уровне является ведомственная и организационная разобщенность учреждений и структур, которые привлекаются к работе над прогнозом. Это затрудняет сбор статистической и прогнозной информации и обмен ею между органами местного самоуправления, территориальными структурами федеральных органов исполнительной власти и органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации (статистических, финансовых и др.). Кроме того, подготовка на муниципальном уровне системы показателей, имеющих «сквозной» характер и предназначенных для передачи субъекту Российской Федерации и федеральным органам, не может быть осуществлена без разработки комплексного прогноза социально-экономического развития муниципального образования, что предусматривается федеральным законом «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» (ст. 6 и 15).

Но у местных органов власти существуют и определенные возможности для обеспечения необходимой информацией. К примеру, во многих территориальных органах Госкомстата России (в том числе и в муниципальных образованиях) систематически ведутся паспорта территорий по достаточно широкому кругу показателей. Практика свидетельствует также о наличии во многих муниципальных образованиях деловых контактов органов власти с субъектами хозяйственной деятельности и территориальными федеральными органами.

Разработка прогнозов социально-экономического развития субъектов Российской Федерации состоит из трех этапов, предусматривающих выполнение следующих мероприятий: 1) составление сценариев социально-экономического развития соответствующих территорий на основе анализа социально-экономической ситуации за предыдущий период и данных среднесрочного прогноза; 2) формирование предварительного варианта основных показателей прогнозов субъектов Федерации (при этом анализируются тенденции развития, оценивается степень их обоснованности и достоверности); 3) разработку уточ-

ненных показателей прогноза социально-экономического развития субъектов федерации (с учетом прогноза развития страны, оценки социально-экономической ситуации в текущем году в отраслях экономики и регионах, вариантов стабилизации их работы и развития, а также доведенных Минэкономразвития РФ до исполнительных органов субъектов Российской Федерации уточненных сценарных условий функционирования экономики и индексов-дефляторов цен).

Системный подход к прогнозированию социально-экономического развития предполагает соблюдение следующих принципов:

- унификация временных горизонтов прогнозирования (долгосрочного, среднесрочного и краткосрочного) для всех уровней управления;
- сопряженность целей и задач, решаемых в разнородные прогнозные периоды;
- единство методологических и методических подходов к разработке прогнозов социально-экономического развития различного уровня;
- обеспечение преемственности на федеральном, региональном и местном уровнях показателей, характеризующих социальное и экономическое положение в отчетный период и параметры социально-экономического развития муниципального образования в прогнозируемый период, что предполагает использование единого методического подхода к расчету «сквозных» показателей;
- единство информационной (статистической) базы разработки показателей прогнозов социально-экономического развития.

Прогнозы социально-экономического развития муниципальных образований занимают особое место и являются специфическими объектами прогнозирования. Прогноз муниципального образования представляет собой комплекс вероятностных оценок возможных путей развития и должен охватывать важнейшие сферы экономики территории и жизнедеятельности ее населения, включая экономическую базу, социально-демографическую ситуацию, уровень жизни, занятость и социальную защиту населения, социальную инфраструктуру, инвестиционный комплекс и финансово-бюджетное обеспечение.

Цель планирования социально-экономического развития муниципального образования состоит в том, чтобы на основе сложившихся тенденций, конкретных социально-экономических условий и перспективных оценок разработать и обосновать оптимальные пути развития муниципального образования. Своевременный учет результатов такого планирования является важным условием для принятия наиболее эффективных мер в экономической, социальной и финансовой политике на всех уровнях управления.

Отличительной характеристикой плановой деятельности на местном уровне является ее направленность в первую очередь на решение собственных проблем социально-экономического развития муниципального образования. Поэтому применительно к муниципальному уровню основные принципы планирования социально-экономического развития могут быть дополнены следующими:

- приоритетностью интересов населения муниципального образования;
- обеспечением комплексного развития муниципаль-

ного образования, который означает подход к муниципальному образованию как к единому целому;

- всемерным повышением экономической самостоятельности и финансовой дееспособности муниципального образования;
- обеспечением экономической заинтересованности хозяйствующих субъектов при сохранении их самостоятельности в совместном решении экономических и социальных проблем муниципального образования на договорной основе.

Важнейшая особенность прогнозов муниципальных образований состоит в их двойной направленности. С одной стороны, прогнозы социально-экономического развития должны обслуживать интересы собственно муниципального образования, определять направления и параметры развития, в наибольшей степени отвечающие его интересам и задачам. С другой стороны, муниципальные образования должны органично вписываться в общую систему государственного управления, предоставляя необходимую информацию для разработки региональных и федеральных прогнозов социально-экономического развития и своевременно получая от субъектов Российской Федерации информацию по основным позициям развития области (края, республики), особенно по вопросам, затрагивающим интересы муниципального образования. Кроме того, региональные органы власти должны обеспечивать единство методических подходов.

Такая двойственная направленность планов-прогнозов социально-экономического развития муниципальных образований предполагает разработку двух групп показателей: предназначенных исключительно для целей местного управления; подлежащих обобщению, агрегированию на региональном и федеральном уровнях.

Кроме того, работа над прогнозами социально-экономического развития должна носить комплексный характер, состоящий в максимальном охвате прогнозными разработками всех сфер хозяйственной и социальной деятельности муниципального образования независимо от форм собственности и ведомственной принадлежности объектов, расположенных на его территории. Особо следует отметить, что прогнозирование параметров натуральных показателей должно осуществляться в тесной увязке с прогнозом финансовых ресурсов, поскольку качественное планирование и прогнозирование развития муниципального образования невозможно без учета перспективы роста финансовых и других ресурсов. При этом для муниципальных образований при прогнозировании крайне важно учитывать сообщаемые им ресурсные возможности субъекта Российской Федерации, в состав которого входит данное муниципальное образование, а также ресурсы федерального уровня, привлечение которых предусматривается федеральными и региональными целевыми программами, а также другими прогнозными документами.

При подготовке плана-прогноза социально-экономического развития муниципального образования могут применяться различные методы. Одним из них является экстраполяция, т. е. составление перспективы, исходя из практики за предшествующий период и предположения, что тенденции и темпы экономического развития в будущем не претерпят значительных изменений. Однако этот

метод пригоден преимущественно на краткосрочный период и для прогнозирования лишь некоторых параметров экономического и социального развития, имеющих более или менее стабильный характер.

Вторым методом является метод экспертных оценок, т. е. прогноз строится на базе оценок, сделанных и обоснованных компетентными специалистами. Но и этот метод не лишен недостатков, так как в нем имеется элемент субъективизма. Можно применять оба эти метода одновременно, используя как объективные тенденции развития, так и мнения экспертов.

Еще одним методом прогнозирования является корреляционный анализ, с помощью которого исследуются закономерности соотношений и связей параметров экономического и социального развития с другими наиболее важными показателями, такими, как численность населения, объем бюджета муниципального образования. В зависимости от конкретных возможностей могут применяться и другие методы.

Планирование социально-экономического развития муниципального образования предполагает разработку нескольких вариантов будущего развития, к примеру оптимистического и реалистичного. Оптимистический прогноз составляется из предположения, что в прогнозируемый период произойдут положительные изменения в экономической базе, инвестиционной сфере, на местном рынке труда, увеличатся собственные доходы местного бюджета, повысится бюджетная самообеспеченность муниципального образования и т. д. Реалистичный прогноз представляет собой наиболее вероятный в складывающихся условиях и обстоятельствах сценарий развития экономики, социальной инфраструктуры и местного бюджета.

В общую систему прогнозирования, в соответствии с федеральным законом «О государственном прогнозировании и программах социально-экономического развития Российской Федерации», включается разработка прогнозов на долгосрочную, среднесрочную и краткосрочную перспективу, соответственно на 10 лет, от 3 до 5 лет, на год.

В зависимости от временного периода прогнозирования цели и задачи прогнозов социально-экономического развития муниципальных образований будут значительно отличаться степенью детализации, масштабом и качественным содержанием. В частности, долгосрочные прогнозы должны быть ориентированы на принципиально новые качественные изменения в развитии муниципального образования. Прежде всего это серьезные структурные преобразования в экономической, социальной, инвестиционной, архитектурно-планировочной и инфраструктурной сферах, освоение новых для муниципального образования производств и сфер деятельности.

При формировании целей и задач прогнозирования важно также учитывать и двойственную природу муниципальных образований. В связи с этим необходимо определить круг проблем и задач (а вместе с ними и систему показате-

лей), решаемых исключительно в рамках местного самоуправления и не выходящих на более высокий уровень управления, и одновременно обеспечить безусловную методологическую, методическую и информационную преемственность прогнозов социально-экономического развития субъекта Российской Федерации, в состав которого входит муниципальное образование, и федерации в целом.

Работу над прогнозом любого временного периода следует начинать с выявления и изучения факторов (переменных величин), влияющих на экономические и социальные процессы. К таким факторам следует отнести основные тенденции и предпосылки развития муниципального образования; уровень развития экономической базы, в том числе отдельных отраслей, расположенных на его территории; наличие природных и финансовых ресурсов; демографические изменения; нормы (нормативы), установленные законодательством Российской Федерации и ее субъектов, правовыми актами органов местного самоуправления.

Кроме того, особо должны указываться важнейшие направления, мероприятия и показатели, которые предусмотрены на прогнозируемый год долгосрочными и среднесрочными прогнозами, региональными и федеральными целевыми программами.

Важно подчеркнуть, что краткосрочный прогноз является одним из элементов общей системы прогнозирования муниципального образования и одна из его важных функций состоит в реализации первоочередных мероприятий, определенных в стратегии развития муниципального образования в его долгосрочном и среднесрочном прогнозе.

Важнейшей исходной информацией для подготовки прогнозов для муниципальных образований являются предварительные варианты развития соответствующего субъекта Российской Федерации и важнейших макроэкономических показателей (темпы инфляции, уровень безработицы, индексы-дефляторы цен по отраслям народного хозяйства и промышленности, изменения в уровне доходов населения и др.).

Небольшие ресурсы местных бюджетов (преобладающая часть которых имеет дотационный характер), как правило, вынуждают местные власти ограничиваться проведением выборочного капитального ремонта объектов муниципальной собственности, обеспечением избирательной поддержки малого предпринимательства. Среди задач краткосрочного прогноза может быть и создание проектного, инвестиционного и бюджетного задела для реализации в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

В любом случае прогноз социально-экономического развития муниципального образования главным образом ориентирован на рациональное использование имеющегося потенциала и местных возможностей: экономической базы, производственной инфраструктуры, социальной сферы, жилищно-коммунального хозяйства, земельных, водных, рекреационных, природно-минеральных и других ресурсов, выгодного экономико-географического положения и природно-климатических условий.

N. T. Avramchikova

SCIENTIFIC-METHODS APPROACHES FORMATION OF PROGNOSIS FOR SOCIO-ECONOMIC DEVELOPMENT OF MUNICIPAL STRUCTURES

In this article the author discloses the current problems of prognosis formation for socio-economic development of municipal structures and gives methods of prognosis.

Е. В. Белякова, Н. Е. Гильц, Н. В. Широченко

СФЕРЫ ВКЛЮЧЕНИЯ МАЛОГО ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА В РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЛОГИСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Раскрываются преимущества включения малых предприятий в логистические системы, формируемые на региональном уровне. Рассматриваются формы взаимодействия предприятий в разных функциональных областях и условия, при которых возможно это взаимодействие.

Процесс формирования сферы обращения товаров и услуг охватывает сложный комплекс взаимосвязанных отношений, складывающийся в сфере закупок, транспортировки, сохранности, упаковки, продажи. Высокие издержки обращения стали важнейшим объектом управления не только на уровне предприятий, но и на региональном уровне. Эти издержки отнесены экономистами к логистическим, и в мировой практике созданы системы управления ими на основе интеграционных процессов с соответствующей инфраструктурой. Имеется опыт создания и эффективного функционирования логистических систем, охватывающих всех участников сферы обращения и развивающихся на базе информационных систем в глобальные логистические системы.

Российская экономика, длительное время изолированная от многих мировых процессов, функционировала в иных условиях, основанных на плановом распределении произведенных продуктов, дефиците многих товаров и услуг. Имеющаяся в советское время инфраструктура не была преобразована в эффективные распределительные сети. Только в конце XX – начале XXI вв. стали формироваться логистические системы, адекватные зарубежным. Следует отметить, что их создание сопряжено с большими финансовыми затратами, длительным сроком окупаемости, что осложняет процесс их формирования.

Процесс формирования сферы обращения и услуг охватывает сложный комплекс взаимосвязанных отношений, складывающихся в сфере осуществления закупок, сохранения, транспортировки, упаковки, продажи и т. п. Издержки обращения на современном этапе развития становятся одним из важнейших факторов повышения конкурентоспособности производителей и объектом управления на региональном уровне. Особенность современной организации товаропотоков в российской экономике характеризуют следующие положения:

- товаропроизводители в условиях рыночной экономики полностью самостоятельны в поиске партнеров (в отличие от плановой экономики);
- информационная база в настоящее время не обеспечивает потребности товаропроизводителей и не дает надежной информации по участникам рынка;
- имеются недостатки в специальном торговом законодательстве;
- инфраструктура товаропотоков не соответствует требованиям рынка, что не позволяет использовать современные логистические технологии;
- складское хозяйство предприятий, плохо оснащенное компьютерными технологиями и складским оборудованием, не соответствует условиям включения в логистические системы.

Усиление конкуренции на региональном рынке ставит его участников перед проблемой поиска новых форм взаимодействия на основе интеграции в создании инфраструктуры, обеспечивающей резкое снижение издержек обращения, расширение рынков сбыта и выхода на другие регионы, включая международные логистические системы.

Можно выделить и другие достоинства данного подхода, а именно:

- фирма, становясь звеном логистической цепи, значительно снижает свои издержки благодаря экономии, которая происходит в результате сотрудничества с другими членами логистической цепи;
- фирма имеет возможность сосредоточиться на тех видах работ, которые являются ключевыми в обеспечении ее конкурентных преимуществ, все остальные виды работ передаются другим фирмам, которые делают их более эффективно, что повышает качество и уровень логистического сервиса в целом;
- фирма имеет возможность повысить степень использования материально-технической базы, включая транспорт, складские и торговые площади;
- у фирмы появляются дополнительные возможности в обмене информацией, повышении квалификации персонала, разработке и реализации новых идей, что в результате приводит к расширению рынков сбыта;
- между членами логистической цепи идет разделение риска пропорционально их вкладу в общие усилия по поддержанию высокой эффективности логистического соглашения.

Проблема создания логистических систем очень сложная и пока находит эффективную реализацию только в зонах интенсивного товарооборота – Москве и Санкт-Петербурге.

Региональные логистические системы особо важны для регионов, находящихся в сложных условиях производства и реализации: с низкой плотностью населения и соответственно возникающими проблемами с объемами производства; высокими транспортными расходами и повышенными издержками производства; усилением конкуренции со стороны регионов, имеющих более благоприятные условия, и т. п. Практика показывает, что в региональные логистические системы могут быть включены логистические парки, логистические центры, логистические распределительные центры и товарные склады. Каждый из них имеет собственный набор функций и возможности координации участников всей логистической системы. Различие заключается в объемах услуг и их видах по отношению к потребителям.

Так, логистический парк как наиболее современная форма логистических услуг представляет собой функциональное звено в макрологистической системе, являясь

важнейшим посредником между производителями и потребителями определенного набора продукции, местом, где грузопотоки концентрируются и распределяются. Преимущество парка состоит в его доступности для клиентов и широком ассортименте транспортно-экспедиционных, складских и сервисных услуг при доставке товаров, а также в организации эффективной системы перевозок грузов в регионе и за его пределами, выполняемыми по интермодальным технологиям.

Основное отличие логистического парка от складского комплекса заключается в том, что при наличии одного девелопера на его площадке могут работать несколько логистических провайдеров. Это повышает конкуренцию и создает более благоприятные условия для клиентов.

Рынок логистических услуг в нашей стране имеет хорошие перспективы. В последние годы заметно вырос интерес к России со стороны известных международных логистических девелоперов и операторов. Так, крупная американская компания «Hines», занимающаяся девелопментом и управлением коммерческой недвижимостью, активно ведет работы по реализации проектов складских комплексов площадью по 100...200 тыс. м² каждый в Московской области. На реализацию первой стадии работ, по данным сайта www.valnet.ru, уже выделено 60 млн долл.

Современные терминалы возводятся в Санкт-Петербурге, Ростове-на-Дону, Самаре, Екатеринбурге, Новосибирске. А терминалы Национальной логистической компании рекомендованы Минздравом РФ и ГТК для таможенного оформления фармацевтических грузов.

Национальная логистическая компания (НЛК) работает на российском рынке логистических услуг с 1995 г. Сегодня НЛК – это несколько самостоятельных структур, оказывающих клиентам полный комплекс данных услуг. В состав компании входят «Национальная логистическая компания» (логистический оператор), «Национальный таможенный брокер», «ТЭК Карго-Транс» (таможенно-складская логистика) и «НЛК-development» (освоение земельных участков, строительство логистических парков). Основные операционные площади НЛК – таможенно-складской комплекс, включающий терминал «Лесной» (Минское шоссе, открыт для клиентов в 1997 г.), терминал «Рент-центр» (Минское шоссе, открыт в 2002 г.) и терминалы, находящиеся в Екатеринбурге и Новосибирске. На сегодняшний день НЛК является бесспорным лидером в сфере хранения и обработки фармацевтических препаратов. Среди ее клиентов, по информации сайта www.transportline.ru, – ведущие фармацевтические компании мира: «BristolMyers Squibb», «Glaxo-SmithKline», «Boots Healthcare», «Nycomed», «Balkanpharma», «Novonordick», «Lunbeck» и «Hoffmann-La Roche».

В качестве основных проблем создания и развития логистических парков в России специалистами отмечаются высокая стоимость заемных средств (многие миллионы долларов); достаточно продолжительные сроки строительства (срок окупаемости складских комплексов может превышать восемь лет); особые требования к земельным участкам по площади, рельефу; нехватка подготовленных кадров, особенно специалистов – операторов и технологов; отсутствие в России производителей высококлассного складского оборудования.

Многие из этих проблем снимаются при размещении парков в регионах, но при этом возникают проблемы их окупаемости (объемы услуг и количество клиентов). Требуется разработка теоретических подходов к проблеме эффективного функционирования логистических парков на региональном уровне, особенно в сибирских регионах. Во-первых, следует признать, что только система логистической инфраструктуры позволит обеспечить реальную конкурентоспособность регионального продукта в этих регионах. Во-вторых, должно быть понимание того, что только во взаимодействии можно достичь реального эффекта от создаваемой инфраструктуры. В-третьих, круг участников должен быть максимально широким, что позволит обеспечить необходимые грузопотоки. В-четвертых, необходимо более тщательно подойти к перечню планируемых функциональных областей, обеспечивающих наиболее полную реализацию потенциала логистического парка.

Рассматривая возможность формирования логистического парка в городе Красноярске, необходимо отметить, во-первых, его уникальное геополитическое положение (Красноярск является географическим центром России и располагается на пересечении различных транспортных путей: Транссиба, Енисея, Северного морского пути, автомагистралей и узлового аэропорта); во-вторых, готовность администрации города оказывать поддержку перспективным проектам, в том числе по формированию региональной логистической системы; в-третьих, наличие заинтересованных в такой системе предприятий и инвесторов. Это находит отражение в программе социально-экономического развития города Красноярска на период до 2010 г., в которой определены такие стратегические направления развития, как развитие оптовой торговли и потребительского рынка, транспортной, инженерной инфраструктуры, повышение конкурентоспособности промышленных предприятий, развитие малого предпринимательства [1. С. 10].

Таким образом, Красноярск имеет все необходимые предпосылки для создания логистического парка.

Особое значение парки приобретают для предприятий малого бизнеса, которые не могут на высоком профессиональном уровне обеспечить все функции по снабжению и реализации продукции. Если рассмотреть основные функции логистического парка, то их можно разделить на три блока.

Первый блок – это организация логистических цепочек, заключение комплексных договоров с клиентами на доставку грузов и осуществление сопутствующих операций, связанных с перевозкой, в том числе нетранспортных операций (таможенной очистки и др.); обеспечение информационного взаимодействия с иностранными железными дорогами и другими иностранными участниками логистических цепочек; маркетинговые исследования рынка, предоставление клиентам справочной информации и т. д. Из перечня приведенных функций видно, что большинство из них на уровне малого предприятия осуществлять некому, что не позволяет такому предприятию даже при условии выпуска продукции высокого качества выходить на другие рынки, особенно зарубежные.

Второй блок – это осуществление контроля выполнения логистических цепочек, транспортных и других опе-

раций, возникающих в пути следования грузов, а также оперативный анализ нарушений согласованного графика перевозки грузов и выработка совместно с поставщиками услуг предложений по ликвидации или минимизации последствий сбоя в логистической цепочке. Эти функции требуют особого технического и информационного обеспечения, налаженных связей и не могут осуществляться непосредственно малыми предприятиями.

Третий блок – это связан с логистическим сервисом и включает организацию информационной поддержки, которая должна обеспечить взаимодействие с клиентами и партнерами, расчеты оптимизации маршрутов перевозок, ведение расчетов со всеми участниками, выполнение других функций, возможных в логистическом парке: складского хранения, комплектования грузов, авто-

транспортного обслуживания, гостиничного сервиса и др. Качественное предоставление услуг позволяет малым предприятиям более эффективно использовать свои площади, выделить отдельные функции на обслуживание.

Таким образом, наличие в регионе логистического парка позволяет предприятиям малого бизнеса получить доступ к высококвалифицированным услугам и снизить издержки обращения. В общем виде возможные функции логистического парка представлены в таблице.

Библиографический список

1. Основные положения проекта программы социально-экономического развития г. Красноярск на период до 2010 г. Красноярск, 2004. 38 с.

Сферы включения малого предпринимательства в логистических парках

Наименование службы	Выполняемые функции	Возможности передачи функций малым предприятиям
Управляющая система	Обеспечение руководства региональным логистическим парком, сертификация товаров и услуг, организация работы торговых представительств	Отсутствуют в силу невозможности децентрализации выполняемых функций
Мультимодальный центр складского хранения и грузопереработки	Хранение и переработка мелко- и крупнопартийных грузов	Частично могут быть переданы малым предприятиям, использующим активы логистического парка на правах концессии или аренды
Мультимодальный контейнерный терминал	Обеспечение погрузочно-разгрузочных работ, эксплуатация подъездных путей	Отсутствуют в силу невозможности децентрализации выполняемых функций
Центр грузового транспорта	Организация перевозок, функционирование автостоянок, выполнение транспортно-экспедиционных функций	Частично могут быть переданы малым предприятиям, использующим активы логистического парка на правах концессии или аренды
Центр технического обслуживания	Техническое обслуживание подвижного состава транспорта, функционирование автомойки, АЗС, ремонт всех видов погрузчиков, технологического оборудования	Могут быть переданы малым предприятиям, использующим активы логистического парка на правах концессии или аренды
Службы производственно-технологического и технического обслуживания	Обеспечение функционирования коммунального хозяйства, тепло- и электроснабжения, очистных сооружений	Отсутствуют в силу невозможности децентрализации выполняемых функций
Центр таможенного оформления и контроля	Таможенный контроль	Отсутствуют в силу невозможности децентрализации выполняемых функций
Гостиничный комплекс	Функционирование блока общественного питания, сервисного и бытового обслуживания, реабилитационно-оздоровительного комплекса	Могут быть переданы
Консалтингово-аналитический центр	Мониторинг поставок, маркетинговые исследования региональных рынков, реклама	Частично могут быть переданы малым предприятиям, использующим активы логистического парка на правах концессии или аренды
Учебный центр подготовки и переподготовки персонала	Подготовка и переподготовка персонала, повышение квалификации в области новых логистических технологий	Могут быть переданы частично
Филиал банка	Валютно-денежные операции, обслуживание счетов, кредитование	Отсутствуют в силу невозможности децентрализации выполняемых функций
Центр оптово-розничной торговли	Организация оптово-розничной торговли	Могут быть переданы
Страховая компания	Страхование	Могут быть переданы
Служба безопасности	Охрана и сопровождение грузопотоков	Могут быть переданы
Центр связи (почта, телеграф, телефон)	Обеспечение связи, поставка информации	Могут быть переданы частично

E. V. Belaykova, N. E. Gilts, N. V. Shirochenko

SPHERES OF INCLUDING SMALL-SCALE ENTERPRISES INTO REGIONAL LOGISTIC SYSTEMS

Advantages of inclusion of the small enterprises into the logistical systems being formed at the regional level are described. Forms of interaction among enterprises in different functional fields and possible conditions of this interaction are considered.

А. А. Бойко, Н. В. Рыбачёк

РАЗВИТИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНОГО АНАЛИЗА НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Показана значимость машиностроительной отрасли для развития российской экономики, сформулированы стоящие перед машиностроением проблемы, рассмотрена история развития функционально-стоимостного анализа (ФСА) за рубежом и в России, выявлены предпосылки использования ФСА на машиностроительных предприятиях, доказана актуальность его внедрения на современном этапе.

Машиностроение и металлообработка – важнейшие отрасли национальной экономики, определяющие состояние производственного потенциала России, обеспечивающие функционирование отраслей народного хозяйства, а также наполнение отечественного потребительского рынка. От уровня развития машиностроения напрямую зависят важнейшие удельные показатели ВВП (материалоемкость, энергоёмкость и др.), экологическая безопасность промышленного производства, производительность труда, обороноспособность страны.

Переход к рыночным условиям хозяйствования болезненно сказался на машиностроительном комплексе. Объёмы промышленного производства сократились в несколько раз, а доля машиностроения в промышленном выпуске продукции уменьшилась до 20 % [4]. По сравнению с развитыми странами, где доля машиностроительной продукции составляет 35...50 % общепромышленного выпуска, в России этот показатель в 1,5...2 раза ниже [5].

По мнению Н. Т. Сорокина, для достижения уровня развитых стран России необходимо обеспечить опережающее (по отношению к другим отраслям промышленности в целом) инновационное развитие машиностроения (темпы его роста должны быть не ниже 8...10 % в год) [5].

Для этого необходимо решить ряд сложных проблем, стоящих перед машиностроением:

- высокий уровень долговой нагрузки (включая платежи в бюджет и внебюджетные фонды);
- недостаток оборотных средств и инвестиций в развитие производства;
- неудовлетворительное состояние активной части основных фондов, т. е. парка технологического оборудования, большая часть которого физически и морально устарела;
- неразвитость внутренних рынков, низкий внутренний спрос и его несоответствие имеющимся производственным мощностям;
- отставание от развитых стран по уровню технологической базы;
- низкий уровень экспорта;
- отсутствие эффективной системы подготовки и переподготовки квалифицированных рабочих и управленческих кадров;
- один из самых низких в промышленности уровень производительности труда;
- слабое взаимодействие с финансово-кредитными организациями;
- опережающие темпы роста цен на продукцию естественных монополий;

– неразвитость инфраструктуры инновационной деятельности;

– низкая эффективность внутренних бизнес-процессов.

По нашему мнению, из всех вышеперечисленных проблем наиболее важной для отечественного машиностроения является низкая эффективность внутренних бизнес-процессов. Решению данной проблемы во многом способствует внедрение на машиностроительных предприятиях процессного подхода к управлению и основанного на нем метода функционально-стоимостного анализа (ФСА).

История функционально-стоимостного анализа уходит своими корнями в 40-е гг. XX в. В период Второй мировой войны перед американской электротехнической компанией «General Electric» встал вопрос, как в связи с возросшей потребностью в военной технике решить проблему нехватки дефицитных цветных металлов, в первую очередь поставляемых из других стран. Инженеры «General Electric» были вынуждены искать замену этим материалам и применили для изготовления некоторых деталей более доступные материалы. Исследования возглавил сотрудник отдела снабжения, инженер Л. Д. Майлс. Проведенный впоследствии анализ данных о работе деталей, выполненных из новых материалов, показал, что все они функционировали нормально, а в ряде случаев повысилась их надежность. Это послужило толчком к проведению исследований по замене дорогостоящих материалов более дешевыми.

Затем возникла идея распространить этот подход на изделие в целом. Л. Д. Майлс стал рассматривать принятую конструкцию изделия лишь как один из возможных вариантов для осуществления определенных функций и построил свою методику так, чтобы, абстрагируясь от существующей конструкции и сосредоточив внимание на функциях анализируемого изделия, можно было найти принципиально новые варианты, обеспечивающие компании минимальные затраты. Руководствуясь этим подходом, группа специалистов во главе с Майлсом проанализировала и изменила конструкцию 230 изделий. В результате сократились затраты на их изготовление (в среднем на 25 %), а экономия составила 10 млн долл. [3].

Майлс назвал предложенный им метод снижения издержек производства анализом стоимости (*Value Analysis, VA*) и определил его как «прикладную философию». Согласно Майлсу, «анализ стоимости – это организованный творческий подход, цель которого заключается в эффективной идентификации непроизводительных затрат, которые не обеспечивают ни качества, ни полез-

ности, ни долговечности, ни внешнего вида, ни других требований заказчика» [6. С. 6].

Первоначально метод, предложенный Л. Д. Майлсом, не получил должного признания, так как многие считали его «азбучной истиной», «азбукой конструирования». Лишь практические примеры, подтвердившие реальную эффективность нового метода, привлекли к нему внимание широкого круга специалистов, прежде всего поставщиков, конкурентов и клиентов компании «General Electric». И наконец, методом анализа стоимости заинтересовались правительственные организации. Первым стало Управление по кораблестроению, входившее в Министерство обороны США. Здесь в начале 50-х гг. анализ стоимости применили на стадии проектирования, назвав его проектированием стоимости, или стоимостным инжинирингом (*Value Engineering, VE*) (далее в статье эту и другие формы анализа стоимости с некоторой долей условности в соответствии с принятой в нашей стране терминологией будем называть функционально-стоимостным анализом).

Успешный опыт применения ФСА Управлением по кораблестроению привлек к этому методу внимание других ведомств Пентагона. И вскоре в целях снижения расходов на производство военной техники министр обороны США Р. Макнамара предложил включать во все контракты, проходящие через его министерство, пункты, обязывающие предприятия применять функционально-стоимостной анализ. Вслед за предприятиями, работающими на Министерство обороны, этот метод стали внедрять и некоторые фирмы-субподрядчики. Их примеру последовали компании, занимающиеся производством товаров широкого потребления. В результате к началу 60-х гг. ФСА стал довольно широко использоваться в системе так называемых правительственных заказов.

В 1959 г. было создано Общество американских инженеров – специалистов по ФСА. Первым его президентом стал Л. Д. Майлс. К середине 60-х гг. было основано несколько специальных научно-исследовательских центров по ФСА, в том числе при американских университетах. В 1975 г. Общество американских инженеров – специалистов по ФСА, которое к этому времени уже имело статус международного, учредило премию «За создание и содействие в деле продвижения метода ФСА» и назвало эту премию именем основателя метода Л. Д. Майлса.

Вскоре функционально-стоимостной анализ приобретает известность не только как инструмент совершенствования технических систем, но и как средство предупреждения неэффективных решений в сфере организации и управления.

Применение нового метода, не защищенного статусом военного секрета, не могло долго ограничиваться рамками только американской промышленности. В 60-х гг. он начинает применяться и в других странах, прежде всего западноевропейских.

В Англии первой компанией, приступившей к внедрению ФСА, была «Associated Electrical Industrial Ltd.» со 100 тыс. работающих. Чуть позже с помощью консультантов из США функционально-стоимостной анализ распространяется на французские фирмы – сначала автомобильной, электротехнической, приборостроительной отраслей промышленности, а затем на отрасли, занима-

ющиеся производством бытовой техники. С 1959 г. ФСА стали внедрять такие западногерманские компании, как «Opel», БМВ. А к 1968 г., согласно опросу руководителей 2 000 западногерманских фирм, функционально-стоимостной анализ применяли 51 % из них [6]. В 1968 г. Объединением немецких инженеров ФРГ были подготовлены специальные инструкции (№ 2801 и 2802), содержащие обобщенные рекомендации по проведению ФСА продукции, а в 1973 г. на их основе был разработан промышленный стандарт DIN № 69910 «Функционально-стоимостной анализ. Понятия и методология». В качестве объекта ФСА стандарт рассматривал не только промышленные изделия, но и процессы, системы, виды деятельности и т. д. С 1975 г. такой же стандарт действует в Австрии. В столице Австрии Вене, издается международный журнал по ФСА «Форум».

Из социалистических стран функционально-стоимостной анализ первыми (не считая СССР) начали применять в ГДР, ПНР и ЧССР. В ГДР в конце 50-х гг. был создан координационный центр ФСА, а в 1973 г. издан специальный стандарт. В ЧССР экспериментальные работы по ФСА начались в 50-х гг. в тракторостроении. В числе первых предприятий, успешно использовавших функционально-стоимостной анализ, были «Адаст» (г. Адамов) и ЗКЛ (г. Брно). В ПНР функционально-стоимостной анализ был впервые применен в 1966 г. в вагоностроительном производстве. В ВНР начало работ по ФСА относится к 1969 г., в СРР – к 70-м гг. (в 1979 г. там был опубликован государственный стандарт), в НРБ – к 1978 г.

В Японии метод ФСА начал применяться позднее, особенно активно после нефтяного кризиса 1973 г. В 1965 г. было основано Общество японских инженеров – специалистов по ФСА, которое активно занялось пропагандой этого метода, проводя ежегодные конференции с участием представителей крупнейших промышленных компаний и государственных организаций. И уже в 70-е гг. функционально-стоимостной анализ применялся в Японии в 10 раз чаще, чем в ФРГ. При производстве новых изделий японские фирмы использовали ФСА в 80...90 % случаев, а при совершенствовании и модернизации продукции – в 50...85 % случаев [3].

В 1982 г. с согласия Л. Д. Майлса Общество японских инженеров – специалистов по ФСА учредило премию его имени, присуждаемую компаниям, которые добивались больших успехов в удовлетворении потребителей благодаря эффективному использованию и распространению метода ФСА. В октябре 1983 г. Л. Д. Майлс первым получил эту премию.

В дальнейшем среди компаний, подразделения которых уже неоднократно получали премию Майлса и продолжали широко использовать функционально-стоимостной анализ, стали проводиться конкурсы на лучшую компанию года. Победителю присуждалась высшая премия Майлса. В 2000 г., в свою 35-ю годовщину, Общество японских инженеров – специалистов по ФСА наградило такой премией компанию «Canon».

В настоящее время функционально-стоимостной анализ широко используется зарубежными фирмами. Среди самых больших компаний мира, перечень которых («Global 500») публикуется на страницах журнала «Fortune», ФСА

применяют «Boeing», «BP Amoco», «DuPont Co.», «Fiat», «General Electric», «General Motors Corp.», «Hewlett-Packard», «Lockheed Martin», «Mitsubishi», «Motorola», «Nissan Motor», «Northern Telecom», «Royal Dutch/Shell Group», «Toyota», «United Technologies Corporation», «Volkswagen», «Xerox Corp.» и др.

Каждый год за счет использования функционально-стоимостного анализа предприятия и правительственные организации экономят миллионы долларов, повышают качество удовлетворения потребностей клиентов. Так, например, только в 1998 г. департаменты скоростных автострад и транспорта США сэкономили из средств федерального бюджета 750 млн долл., что на 47 % больше, чем в 1997 г. В 1999 г. экономия составила уже 845 млн долл. В среднем на каждый инвестированный в ФСА доллар правительственные организации США получают более 20 долл. прибыли [2]. В США даже приняты законы, обязывающие использовать функционально-стоимостной анализ при выполнении правительственных заказов: закон № 99–662 от 1986 г. «О разведке водных ресурсов и очистке сточных вод», если финансирование работ осуществляется из федерального бюджета и превышает 10 млн долл., и закон № 104–106 от 1996 г., утверждающий ассигнования на национальную безопасность.

В последнее время в США появились новые направления функционально-стоимостного анализа и новые идеи, дополняющие прежние концепции:

– Value Management (управление стоимостью) – комплексный метод, включающий в себя и Value Analysis, и Value Engineering;

– Value Research (исследование стоимости) – изучение нового изделия, основанное на принципах функционально-стоимостного анализа, но при условии использования новой технологии и новых средств производства;

– Design to Cost (проектирование согласно заданным затратам) – при создании нового изделия ограничивает расход материальных, трудовых и финансовых ресурсов предварительно заданной величиной;

– Design to Life Cycle Cost (проектирование согласно заданным затратам по стадиям жизненного цикла изделия) – в составе затрат, связанных с изделием, учитывает также эксплуатационные расходы и расходы на обслуживание и ремонт на протяжении всего срока его службы вплоть до утилизации, причем и в этом случае общие затраты с самого начала ограничены сверху;

– Design for Cost (проектирование в соответствии с затратами) – ориентация инженерного процесса на то, чтобы при удовлетворении и обнадёживающем превышении требований клиента уменьшить затраты на всех стадиях жизненного цикла изделия и др. [1].

Основы функционально-стоимостного анализа в нашей стране были заложены в конце 40-х гг. XX в. инженером-конструктором Пермского телефонного завода Ю. М. Соболевым. Исходя из положения, что резервы экономии имеются на каждом производстве, он проанализировал ряд узлов однотипных изделий, выпускаемых разными предприятиями, и, обнаружив в них массу недоработок (неоправданное усложнение формы, завышенные точности и чистоты обработки, дорогие покрытия и т. д.), пришел к мысли использовать системный технико-

экономический анализ и поэлементную отработку конструкции каждой детали.

Он рассматривал каждый конструктивный элемент, характеризующий деталь (материал, размер, допуски, резьбу, отверстия, параметры шероховатости поверхностей, словом, все то, что в той или иной мере характеризует деталь и заложено в технические требования чертежа), как самостоятельную часть конструкции и, в зависимости от функционального назначения, включал его в одну из двух групп: основную или вспомогательную. Элементы основной группы характеризуются тем, что от них зависят качество и работа детали. Поэтому они должны соответствовать эксплуатационным требованиям, предъявляемым к детали. Элементы вспомогательной группы служат для полного конструктивного оформления детали и не изменяют ее функционального назначения.

Поэлементный экономический анализ конструкции показал, что затраты, особенно по вспомогательной группе элементов, как правило, завышаются и их можно сократить без ущерба для качества изделия. Именно в результате расчленения детали на элементы лишние затраты стали заметными. Индивидуальный подход к каждому элементу, выявление излишних затрат на реализацию каждого элемента и составили основу метода Соболева.

Основное отличие метода Соболева от метода Майлса состояло в том, что первый был направлен на поиск более экономичных способов изготовления изделия преимущественно в рамках существующего конструкторского решения, в то время как Майлс и его последователи в основу своего метода положили функцию, рассматривая исходную конструкцию изделия лишь как один из возможных вариантов для выполнения определенных функций. Они предлагали искать новые варианты и при обязательном сохранении качества, надежности и других эксплуатационных требований и характеристик выбирать из их числа наиболее экономичный вариант.

Директор Пермского телефонного завода А. П. Кулаков поддержал начинание молодого специалиста, и вскоре методом пермского конструктора заинтересовались руководители других заводов страны. С его участием проводились региональные совещания конструкторов и технологов. На одном из таких совещаний в Ленинградском доме научно-технической пропаганды было отмечено, что этот метод может найти применение на любом предприятии. Однако существовавший в то время в СССР механизм хозяйствования не способствовал распространению метода Соболева, и, к сожалению, в течение последующих двух десятилетий идеи, сформулированные им, не получили должного развития.

Метод функционально-стоимостного анализа в СССР стал внедряться в конце 60-х гг. Но только в 1975 г. из книги Х. Эберта и К. Томаса «Анализ затрат на основе потребительской стоимости (новые методы рационализации)», вышедшей в ГДР и позднее переведенной и изданной в СССР, советские экономисты узнали, что основы этого высокоэффективного метода были разработаны именно в нашей стране.

Одним из первых в СССР внимание на метод Майлса обратил сотрудник отдела зарубежной экономики и информации института «Информэлектро», заведующий ла-

бораторией исследования зарубежного опыта управления Е. А. Грамп. Работая над диссертацией, он заинтересовался методикой, позволяющей американским корпорациям получать существенные прибыли, поддерживать конкурентоспособность своей продукции, находить принципиально новые варианты решений при проектировании изделий, не снижая их качества и при этом уменьшая затраты на его обеспечение.

В 1970–1971 гг. Е. А. Грамп подготовил и опубликовал ряд аналитических обзоров и статей, в которых были приведены основные теоретические, методологические и организационные положения функционально-стоимостного анализа продукции и даны рекомендации по его практическому использованию. Эти публикации, первые в стране по данной проблематике, широко использовались на предприятиях электротехнической отрасли.

В 1974–1975 гг. Е. А. Грамп принимал непосредственное участие в работе по проведению ФСА светотехнических изделий в рамках совместного проекта института «Информэлектро» и Московского ПО «Электролуч». Затем метод ФСА начал применяться в ВНИИ «Электроаппарат», Чебоксарском электроаппаратном заводе, Свердловском машиностроительном заводе имени Воровского, ПО «Уралмаш» и др. Новый метод позволил снизить непроизводительные затраты на производстве.

В 1976 г. коллегия Министерства электротехнической промышленности приняла решение о внедрении ФСА в качестве системного метода снижения затрат на производстве. В 1977 г. в Минэлектротехпроме была создана первая в СССР трехуровневая система управления ФСА: в министерстве имелся координационный совет по ФСА во главе с заместителем министра, в научно-исследовательских институтах – комитеты, лаборатории, группы, бюро по ФСА, подобные подразделения стали действовать и на предприятиях.

В принятом в 1982 г. Постановлении ЦК КПСС «О работе Министерства электротехнической промышленности по экономии материальных и трудовых ресурсов в свете требований XXVI съезда КПСС» был отмечен положительный опыт использования функционально-стоимостного анализа в электротехнической промышленности; Госплану, ГКНТ, Госкомтруда и ЦСУ СССР даны поручения обобщить этот опыт и распространить его на предприятиях народного хозяйства страны.

В том же году Государственный комитет СССР по науке и технике одобрил подготовленные коллективом ведущих специалистов страны «Основные положения методики проведения функционально-стоимостного анализа изделий». Были разработаны межотраслевые положения проведения ФСА, утвержден план общесоюзных мероприятий по расширению использования ФСА в народном хозяйстве. Среди них – превращение нескольких объединений и предприятий в показательные по ФСА, включение работ по ФСА в целевые научно-технические программы, научное обеспечение развития метода, изучение возможностей учета требований ФСА при утверждении цен, проектов, смет, определении размеров финансирования и кредитования объекта, разработка стандартов, подготовка инженерных и экономических кадров, владеющих методом ФСА, выпуск литературы, дальней-

шая пропаганда метода, научно-техническое сотрудничество с зарубежными странами и др.

Однако резкое ухудшение экономической ситуации в России с начала 90-х гг. прошлого века не могло не сказаться и на состоянии работ по ФСА. Повсеместно на предприятиях были свернуты исследования в этой области, практически прекратилась подготовка специалистов по функционально-стоимостному анализу в институтах повышения квалификации и учебных центрах, резко сократилось количество издаваемой литературы, а накопленный за 50 лет применения метода богатейший опыт оказался незаслуженно забытым. Из-за развала предприятий некоторые специалисты по функционально-стоимостному анализу оказались невостребованными, а потому выехали за рубеж или были вынуждены переквалифицироваться.

В настоящее время функционально-стоимостной анализ в России вступает в качественно новый этап – этап возрождения. Проводятся семинары, появляются публикации, издаются книги и сборники научных трудов, разрабатываются интеллектуальные компьютерные технологии поиска и принятия решений.

Основными предпосылками использования ФСА на современных российских машиностроительных предприятиях являются обострение конкурентной борьбы, внедрение процессного подхода, рост накладных расходов, внедрение информационных технологий, динамичность внешней среды, «несовершенство» исполнителей, индивидуализация продукции. Рассмотрим эти предпосылки.

1. *Обострение конкурентной борьбы.* В связи с переходом к рыночным условиям хозяйствования развитие промышленности в России в последние годы характеризуется обострением конкурентной борьбы. Более того, надвигающаяся глобализация лишает российских производителей возможности укрыться от иностранных конкурентов за национальными границами.

В этой ситуации обязательным условием долгосрочного выживания предприятия является достижение им конкурентоспособности. У производителей практически не остается другого выхода, как трансформироваться в конкурентоспособные компании мирового уровня, оптимизировав свои бизнес-процессы. Конкурентоспособность может быть достигнута либо за счет повышения качества, либо за счет снижения стоимости. Решению этих задач способствует внедрение на предприятиях метода ФСА, который позволяет выявить сильные и слабые стороны организации бизнеса с точки зрения создания потребительской стоимости. На основании данных ФСА разрабатывается будущая модель организации производства. В результате снижается стоимость бизнес-процессов, сокращается продолжительность их выполнения, что немедленно отражается на конкурентоспособности предприятия. Таким образом, функционально-стоимостной анализ способствует созданию конкурентных преимуществ, которыми должно обладать каждое предприятие.

2. *Внедрение процессного подхода.* В последнее время в связи с внедрением на российских предприятиях новых стандартов управления качеством серии ИСО 9000, основанных на процессном подходе, потребность в функционально-стоимостном анализе стала особенно острой. Процессный подход, сформировавшийся к сере-

дине 80-х гг. прошлого столетия, является развитием функционального подхода, но в то же время выступает некоторой альтернативой ему.

При функциональном подходе к управлению за каждой структурной единицей предприятия (сотрудником, отделом) закреплена ряд функций, описана область ее ответственности, сформулированы критерии успешной деятельности. При этом, как правило, горизонтальные связи между структурными единицами предприятия слабы, а вертикальные связи по линии «начальник – подчиненный» сильны. Подчиненный отвечает только за порученные ему функции и, возможно, за деятельность своего подразделения в целом. Функции и результаты работы параллельных структурных единиц его не интересуют. В результате на предприятии нередко возникают обособленные островки автоматизации и управления, где узкоспециализированная задача (например, бухгалтерский учет) берет верх над общекорпоративной (поставка товаров и услуг на рынок). Чаще всего это приводит к созданию непроницаемых внутренних стенок между подразделениями.

Чтобы устранить недостатки функционального подхода, многие российские производители переходят к регулярному взаимосвязанному управлению, основанному на процессном подходе. При этом подходе к управлению каждая структурная единица обеспечивает выполнение конкретных бизнес-процессов, в которых она участвует. Обязанности, область ответственности, критерии успешной деятельности для каждой структурной единицы имеют смысл лишь в контексте конкретных бизнес-процессов. Горизонтальные связи между структурными единицами при таком подходе значительно сильнее, а вертикальные связи по линии «начальник – подчиненный» – несколько слабее. Сотрудник отвечает не только за свои функции, но и за те бизнес-процессы, в которых он задействован. Функции и результат деятельности параллельных структурных единиц, которые участвуют в тех же бизнес-процессах, что и он, для него становятся важными. Возникает взаимная ответственность за результат бизнес-процесса между всеми его участниками.

Одной из задач процессного подхода является оценка эффективности бизнес-процессов. В самом общем виде эффективность – это отношение результата к затратам, обеспечившим его получение. Традиционные методы определения затрат ориентированы на продукцию, а потому не подходят для процессного подхода. В данном случае необходимо воспользоваться методом, фокусирующимся на бизнес-процессах. Таким методом как раз и является функционально-стоимостной анализ. Таким образом, внедрение на предприятиях процессного подхода осуществляется с использованием ФСА.

3. Рост накладных расходов. В настоящее время продуктовая стратегия большинства российских предприятий разрабатывается на основе заимствованной из финансовой отчетности информации, аккумулированной традиционной системой учета затрат. Эта система точно измеряет потребленные продуктами основные материалы и труд основных производственных рабочих ввиду простой причинно-следственной связи между ними. Остается измерить только накладные расходы. Вот тут-то и возникают сложности.

При отнесении накладных расходов на тот или иной вид продукции традиционная система учета затрат в качестве базы их распределения использует, как правило, время работы основных производственных рабочих или оборудования и тем самым искажает истинную себестоимость продукции. Как показывает практика, наиболее затратноемыми обычно являются продукты с наименьшим объемом производства и наибольшей сложностью. При применении традиционной системы учета затрат они оказываются недооцененными. Напротив, наименее затратноемыми являются продукты с наибольшим объемом производства и наименьшей сложностью. При применении традиционной системы учета затрат именно они оказываются переоцененными.

Традиционная система учета затрат была создана несколько десятилетий назад, когда ассортимент выпускаемой предприятиями продукции был ограничен и доминирующими затратами являлись затраты на основные материалы и труд основных производственных рабочих. Накладные расходы были относительно невелики, поэтому искажения себестоимости продукции вследствие неадекватного распределения накладных расходов были незначительными.

Сегодня предприятия автоматизируют свои бизнес-процессы и производят весьма широкий ассортимент продукции. Следствием этого является существенный рост доли накладных расходов в общей структуре затрат. Соответственно возрастают искажения себестоимости, рассчитываемой на основе традиционного подхода к учету затрат, в результате чего менеджеры предприятия могут принять неверное решение относительно номенклатуры выпускаемой продукции, допустим свернуть производство продукта, приносящего прибыль, или продолжить производство реально убыточного продукта.

Устранить вышеперечисленные недостатки традиционной системы учета затрат позволяет метод ФСА, поскольку функционально-стоимостной анализ фокусирует внимание сначала на бизнес-процессах предприятия и только потом – на единице продукции. Эта логика объясняется следующим образом. Одна и та же продукция может быть выпущена с разными усилиями и, соответственно, затратами. Это значит, что затраты порождаются не самим фактом выпуска продукции, а той или иной организацией деятельности людей, действиями сотрудников, интегрирующимися в бизнес-процессы. В конечном счете себестоимость единицы продукции складывается из стоимости необходимых для ее изготовления материалов и связанных с ее производством бизнес-процессов. Таким образом, функционально-стоимостной анализ способствует определению истинной себестоимости продукции.

4. Внедрение информационных технологий. Функционально-стоимостной анализ бизнес-процессов – довольно-таки трудоемкая процедура. Так, на моделирование и анализ одного бизнес-процесса, состоящего из 10...20 функций, требуется 1...1,5 рабочего дня аналитика высокой квалификации. Сегодня в качестве средств инструментальной поддержки ФСА бизнес-процессов российские производители могут использовать такие программные продукты, как VPwin, EasyABC Plus и др. Та-

ким образом, в связи с внедрением информационных технологий возможности применения функционально-стоимостного анализа на российских предприятиях существенно расширятся.

5. *Динамичность внешней среды.* Постоянно изменяющаяся внешняя среда, в которой вынуждены действовать российские предприятия, требует ускоренной их адаптации к новым условиям. Чтобы удержать свои рыночные позиции, производители должны постоянно совершенствовать свои бизнес-процессы. Это означает, что необходимо устранить функции, которые в новых условиях существования предприятия стали ненужными; добавить функции, отвечающие новым требованиям внешней среды; определить требуемую степень выполнения этих функций и необходимое для этого ресурсное покрытие. Решению этих задач во многом способствует внедрение на предприятиях метода функционально-стоимостного анализа.

6. *«Несовершенство» исполнителей.* Любое предприятие, в особенности крупное машиностроительное, даже если на момент своего основания оно было построено по вполне оптимальной схеме, со временем теряет исходную оптимальность, приобретает функциональную несогласованность, нелогичность, непрозрачность. Бизнес-процессы запутываются, происходит отход от изначальных приоритетов деятельности и т. п. Причинами этого являются «несовершенство» исполнителей, субъективность их восприятия, привыкание к определенным негативным явлениям, сложности применения теоретических принципов к конкретным человеческим отношениям, текучесть кадров. Все это приводит к постепенной деформации базовых принципов и ориентиров, отходу от оптимальности, нарастанию стихийного развития и, в конечном итоге, к мутации системы управления и предприятия в целом. Чтобы вернуться к оптимальности, необходимо осуществить полную реорганизацию предприятия, в том числе реинжиниринг бизнес-процессов. Реинжиниринг предполагает переосмысление и перепроектирование бизнес-процессов компаний с целью существенного улучшения таких показателей их деятельности, как стоимость, качество и скорость. Значительную помощь в проведении реинжиниринга может оказать функционально-стоимостной анализ.

7. *Индивидуализация продукции.* Не менее важной предпосылкой внедрения ФСА на предприятиях является эволюционная трансформация рынков сбыта, выражающаяся в индивидуализации продуктов массового потребления. Индивидуализация не только проявляется в принципиально новых свойствах продуктов, но и, как правило, затрагивает внешние формы, составляя основу или сущность объекта, наделяя его такими востребованными потребителем специфическими чертами, как цвет, комплектация, сервис, качество, стоимость и т. д. Чтобы сохранить своих клиентов, которые желают получить то, что соответствует их финансовым возможностям, техническим и эстетическим требованиям, производители должны постоянно совершенствовать свои бизнес-процессы. Решению этой задачи также во многом способствует внедрение на предприятиях метода функционально-стоимостного анализа.

Таким образом, необходимость использования функционально-стоимостного анализа на современных машиностроительных предприятиях становится все более и более очевидной.

Библиографический список

1. Барышников, А. А. Формы применения функционально-стоимостного анализа / А. А. Барышников, А. М. Кузьмин // *Машиностроитель*. 2001. № 6. С. 37–40.
2. Кузьмин, А. М. Функционально-стоимостной анализ. Концепции и перспективы / А. М. Кузьмин, Е. А. Кузьмина // *Методы менеджмента качества*. 2002. № 8. С. 8–14.
3. Кузьмин, А. М. Функционально-стоимостной анализ. Экскурс в историю / А. М. Кузьмин, Е. А. Кузьмина // *Методы менеджмента качества*. 2002. № 7. С. 15–20.
4. Митин, С. Г. Машиностроение как приоритет промышленного развития в российской экономике / С. Г. Митин // *Машиностроитель*. 2001. № 3. С. 1–6.
5. Сорокин, Н. Т. Основные тенденции развития российского машиностроения в условиях переходной экономики / Н. Т. Сорокин // *Промышленная политика в Российской Федерации*. 2004. № 3. С. 12–21.
6. Справочник по функционально-стоимостному анализу / под ред. М. Г. Карпунина, Б. И. Майданчика. М.: Финансы и статистика, 1988.

A. A. Wojko, N. V. Ribachek

THE DEVELOPMENT OF VALUE ANALYSIS AT MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

The article discusses the significance of machine-building industry for Russian economy, formulates problems, faced by the machine-building, reviews the history of value analysis development abroad and in Russia, reveals prerequisites of using the value analysis at small-scale enterprises, and proves the importance of value analysis implementation.

А. В. Ворожцов, Л. М. Мукоед

ИННОВАЦИОННАЯ КОРПОРАТИВНАЯ ПОЛИТИКА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рассматриваются направления и содержание корпоративной политики высокотехнологичных организаций с позиции задач инновационного развития.

Проблемы разработки и распространения наукоемких технологий актуальны в силу их особой значимости для поступательного развития экономики и общества, поскольку они способствуют и обеспечивают повышение жизненного уровня за счет интенсивных факторов: роста производительности труда, снижения относительного уровня потребления и повышения эффективности использования невозобновимых природных ресурсов [1].

Современная оценка роли науки основана на том, что только она может служить долговременной базой для роста экономики и поддержания высокого уровня занятости населения. При этом существенной частью механизма научно-технического развития являются наукоемкие отрасли.

Деятельность наукоемкой отрасли неразрывно связана с использованием высоких технологий (hi-tech-технологий), вклад которых в общую стоимость производимой продукции составляет обычно весьма значительную ее часть. Можно сказать, что наукоемкие отрасли выпускают, главным образом, высокотехнологичную продукцию [2]. Соответственно предприятия, выпускающие такую продукцию, можно назвать высокотехнологичными. Для удержания авангардных позиций в экономике и бизнесе высокотехнологичные производства должны постоянно подтверждать высокую эффективность и полезность для потребителя. Достигаются эти цели путем повышенной инновационной активности компаний, производящих все более сложные продукты или услуги, пользующиеся спросом. К ним можно отнести предприятия авиационно-космической отрасли, телекоммуникации и другие hi-tech-фирмы. Как показывает мировой опыт, это позволяет им, при прочих равных условиях производить на единицу потребляемого капитала существенно большее количество продукции, нежели в особо капиталоемких сырьевых отраслях и отраслях низших переделов, что в свою очередь является одним из стимулов ускоренного развития высоких технологий [3].

Сложность и масштабность задач, стоящих перед российскими наукоемкими производствами, может быть наглядно проиллюстрирована следующими данными. В настоящее время доля России в мировом объеме торговли гражданской наукоемкой продукцией оценивается в 0,3...0,5 % (для сравнения: аналогичная доля США – 36 %, Японии – 30 %, Германии – 17 %, Китая – 6 %). Доля расходов на науку в ВВП в 2002 г. составила 0,28 %, в 2003 г. – 0,31 %, что значительно ниже соответствующего показателя в развитых странах (2...3 %) [9].

Главные задачи перевода российской экономики на инновационный путь развития следующие:

– модернизация промышленности на основе инноваций, приоритетное развитие обрабатывающих, наукоем-

ких отраслей экономики, увеличение объема выпуска высокого передела продукции, ее доли в экспорте, улучшение показателей материалоемкости и энергоемкости производства;

– создание национальной инновационной системы, обеспечивающей эффективную коммерциализацию знаний, построение адекватной инновационной инфраструктуры (центры трансфера технологий, технико-внедренческие зоны, система фондов начального финансирования инновационных проектов и т. д.) и выбор приоритетов инновационного развития;

– повышение доли отечественной промышленной продукции в общем объеме ее национального потребления, создание новых рабочих мест, повышение социальной привлекательности научно-технической деятельности;

– интеграция российской экономики в мировую инновационную систему, завоевание своего места в интеллектуальном секторе глобальной экономики.

Осуществление мер, необходимых для обеспечения структурного перехода российской экономики в направлении наукоемких высокотехнологичных секторов рынка, по модернизации промышленности на основе инноваций, должно быть основано на следующих принципах [9]:

– государство, бизнес и наука совместно формируют и реализуют крупные проекты, участвуя в них доступными им ресурсами;

– процессы интеграции российских компаний в мировой рынок поддерживаются через создание транснациональных корпораций или участие в них;

– должно стимулироваться развитие и укрупнение малых и средних высокотехнологичных компаний, формирование новых крупных промышленных собственников из числа успешных менеджеров и предпринимателей.

Особенностью экономики Российской Федерации является многообразие организационно-правовых форм предприятий, выступающих как полноправные субъекты рынка. Появление новых форм собственности, усложнение взаимоотношений между собственниками, менеджерами компаний, органами государственного и муниципального управления породили множество объективно обусловленных проблем, сдерживающих, а зачастую и просто препятствующих развитию предприятий. Большинство из этих проблем не являются новыми для мировой практики и получили уже достаточно полное освещение как в ряде классических работ зарубежных ученых-экономистов, так и в конкретных международных документах, в рамках соответствующей области менеджмента, известной сейчас как корпоративное управление [8].

Как известно, корпоративное управление есть деятельность, связанная с функционированием корпорации, ко-

торая обусловлена отношениями собственности между субъектами собственности, а также отношениями между этими субъектами и другими заинтересованными группами (наемные руководители и работники, клиенты, поставщики, государственные органы).

Понятие «корпорация» в России связано в большей степени не с организационно-правовой формой, потому что в российском законодательстве таковой не существует, а с формой организации предпринимательской деятельности, предусматривающей долевую собственность участников, самостоятельный юридический статус и сосредоточение функций управления в руках менеджмента. Под это определение могут попадать не только акционерные, но и другие виды обществ (с дополнительной или ограниченной ответственностью). В данном случае мы будем понимать под корпорацией фирмы, занимающиеся высокими технологиями, независимо от организационно-правовых форм собственности.

Нужно отметить, что процессы создания высокотехнологичных корпораций в России и, соответственно, формирования их акционерного капитала шли несколькими путями. В качестве основных выступали процессы масштабной приватизации, в результате которых государственные предприятия преобразовывались в акционерные общества (с использованием той или иной модели приватизации).

Одновременно происходили и процессы целенаправленного создания новых организаций в области высоких технологий путем учреждения их в форме акционерных обществ, зачастую с участием государственных предприятий или органов государственного управления. Характерным примером здесь является появление инновационно-технологических центров, ориентированных на продвижение инновационных проектов в высокотехнологичных областях и их коммерциализацию.

Наконец, еще одним направлением корпоратизации в рассматриваемой области стало выделение из состава крупных государственных предприятий небольших организаций с корпоративной структурой капитала, ориентированных на реализацию имеющегося потенциала в сфере высоких технологий с гибкой реакцией на запросы тех или иных сегментов рынка (в частности, на реализацию конверсионных программ).

В любом из перечисленных случаев с началом структурных перемен внутри самих компаний изменялось количество совладельцев компании – от нескольких крупных акционеров до большого количества мелких держателей акций. Одновременно формировался профессиональный кадровый состав ведущих специалистов и управляющих работников, работающих за зарплату, контролирующих все имущество фирмы и руководствующихся собственными представлениями о ее целях, задачах и технической политике. При этом цели высших руководителей зачастую не соответствовали целям акционеров.

Конфликт интересов акционеров и менеджеров, традиционно являющийся одной из проблем корпоративного управления вообще, в данной ситуации усугублялся еще и тем, что новый собственник (или собственники) компании, преследующий цель максимизации прибыли, не обязательно связывал перспективы фирмы именно с обла-

стью высоких технологий [8]. Именно поэтому управление фирмой, работающей в области hi-tech, требует четко сформулированного, известного и удовлетворяющего интересам как менеджеров и акционеров, так и всех сотрудников, определения цели и миссии предприятия, а также основополагающих принципов их достижения.

В противном случае люди, принимающие решения на различных уровнях управленческой иерархии, либо не будут их принимать вовсе, либо будут действовать на основе собственных, несовместимых и конфликтующих между собой теорий предприятия, отражающих в первую очередь личные интересы, а в лучшем случае – интересы группы (например, структурного подразделения). И то, и другое не способствует эффективной деятельности. Поэтому крайне важно для любого предприятия, особенно высокотехнологичного, определить единственное место, где будет формулироваться общая концепция построения эффективного функционирования и развития предприятия, обязательная для всех сотрудников – от уборщицы до генерального директора. Этим и занимается корпоративная политика.

Таким образом, корпоративная политика является важнейшим инструментом согласования интересов субъектов производства, менеджеров и собственников. Не следует забывать и о том, что корпоративная политика высокотехнологичной компании должна учитывать также приоритетные направления развития науки и технологий в России. Ведь в данном случае необходима организация совместной работы власти, бизнеса и научного сообщества по поиску, созданию новых и сохранению имеющихся рынков наукоемких товаров и услуг. Такая работа может быть организована путем создания совместных конкурсных комиссий по поиску и отбору приоритетных направлений технологического развития и совместных специализированных фондов с долевым участием государства и бизнеса. При этом принципиально важно то, что количество приоритетов инновационного развития технологий для наукоемкой промышленности должно быть ограничено в связи с ограниченным объемом доступных ресурсов, а их формирование должно осуществляться на основе совместного анализа и прогноза развития научно-технологической сферы и соответствующих рынков. Подобная организация работ по реализации важнейших инновационных проектов государственного значения показала перспективность предложенного подхода [9].

Относительная молодость цивилизованных корпоративных отношений в современной России привела к тому, что теорией и практикой корпоративного управления научного определения понятия «корпоративная политика» пока не выработано. В рамках рассматриваемой проблематики мы придерживаемся позиции В. Г. Паршкова, который считает, что корпоративная политика имеет следующие особенности:

- во-первых, ни в коем случае не является набором готовых рецептов, а системой ценностей предприятия, позволяющих на каждом уровне задавать верные вопросы и корректно ставить тактические задачи;
- во-вторых, дает для сотрудников общие направления движения и некоторые простые правила, не претен-

дающие на универсальность, но дающие алгоритмы решения проблем в каждой конкретной ситуации;

– в-третьих, формулировки целей должны удовлетворять следующим принципам: четко и конкретно описывать ближайшие и стратегические цели; цели должны быть не легкими, но в принципе достижимыми в заранее заданный промежуток времени¹.

Корпоративная политика, или корпоративные стандарты, как обязательный для каждого юридического лица набор внутренних регламентирующих документов могут затрагивать практически все аспекты деятельности организации. В самом широком смысле это действительно корпоративная политика организации, которая может определять абсолютно все аспекты ее деятельности: от правил формирования портфеля заказов, заключения договоров и других сделок до правил, определяющих одежду персонала и систему подарков клиентам и сотрудникам.

Очень важно, чтобы в эту систему стандартов были включены так называемые интерфейсные стандарты, которые определяют правила взаимодействия между структурными компонентами организации (особенно удаленными подразделениями). Например, холдинговые структуры определяют правила транспортировки товаров, прием и передачу товаров между компонентами холдинга, правила финансового учета, правила консолидации финансовой отчетности, а следовательно, правила ведения финансовой отчетности в каждом из предприятий холдинга, стандарты на кодирование и обмен данными между его компонентами [7].

Сюда же входит большое количество стандартов, связанных с управлением качеством, и вытекающие из требований системы качества стандарты на взаимодействие между функциональными элементами бизнеса: складами и производством, транспортными и приемными службами, получателем и поставщиком. К данной группе могут быть отнесены системы качества, разработанные на основе стандартов ISO 9000, ISO 14000 и других аналогичных стандартов, поскольку они требуют применения к деятельности конкретного предприятия, хотя сами по себе относятся к группе, составляющей внешнее окружение [7].

Корпоративная политика должна включать целый ряд элементов (разделов), в соответствии с важнейшими целевыми направлениями и сферами деятельности, которые существуют у предприятий, в том числе и высокотехнологичных. Это кадровая, маркетинговая, инвестиционная, социальная, информационная политика и т. д. Особенно необходимо выделить инновационную политику, ведь именно ей hi-tech-компаниям нужно уделять важное внимание.

Наука превращается в одну из самых важных сфер бизнеса. Специалисты прогнозируют, что предприятие, регион или страна, которые окажутся неспособными наращивать свой научно-технологический потенциал, будут обречены как минимум на глубокую зависимость, а скорее – на поглощение (прямое или косвенное) другими инновационно сильными предприятиями, регионами, государствами. По оценкам специалистов, уже через четверть века это станет реальностью.

В связи с наметившимся переходом к экономике высоких технологий, теоретики – люди, работающие в сфере науки и образования, – и практики – руководители предприятий и организаций – все чаще задаются вопросом о том, каковы самые современные принципы и тенденции в методологии инновационного управления. Инновации не только принято считать залогом устойчивого экономического развития, но и связывать с венчурным, а значит рискованным предпринимательством. Да, в инновационной деятельности не обойтись без риска. Но по существу вся экономическая деятельность связана с неопределенностью результата, а вкладывать ресурсы в день вчерашний намного рискованнее, чем в день завтрашний. Как показывает передовой зарубежный и отечественный опыт, внедрение инноваций может оказаться высокорискованным только для тех, кто не обладает достаточной компетентностью и не владеет современной методологией [4]. Корпоративная политика позволит преодолеть унаследованное от советского периода иждивенческое отношение промышленных корпораций к научному и инновационному секторам экономики как к объектам попечительства исключительно со стороны государства. В процессе формирования национальной инновационной системы происходит отработка механизмов обеспечения под патронажем государства равных и справедливых, с экономической точки зрения, условий доступа к научно-техническим результатам разработок, полученным с участием средств федерального бюджета, всех заинтересованных предприятий. Решение последней задачи является необходимым условием развития соответствующих отраслей в целом, а не укрепления конкурентных позиций какого-либо отдельно взятого участника проекта [9]. В данном случае государство исходит из того, чтобы помогать высокотехнологичным фирмам не полностью, а через совместное участие вместе с менеджментом и акционерами компании.

Инновационное развитие чаще всего отождествляют с производственно-хозяйственным уровнем принятия решений. На самом деле разработку и реализацию новых технологий нужно относить к стратегически важным управленческим решениям.

Выведение процессов разработки и реализации новых технологий с производственно-хозяйственного и функционального уровней на корпоративный приводит к повышению роли инновационной деятельности в общей системе управления предприятием. Это позволяет не только повысить иерархический статус и стратегическое значение инновационного развития по отношению к другим направлениям роста, но и установить динамичное соответствие между инновационной и другой перспективной деятельностью предприятий. Речь идет о том, чтобы при разработке и реализации инноваций не только анализировать взаимосвязь технологических и нетехнологических направлений корпоративного роста и развития, сколько применять принципы стратегического управления к инновационному менеджменту хозяйствующих субъектов [5].

Любая стратегия – это изменения, а любые изменения, направленные на совершенствование какого-либо процесса, – это инновации. Одного участия технологов в стратегических вопросах недостаточно. В мире новых тех-

¹По материалам сайта <http://www.pplus.ru/>.

нологий стратегия и инновации должны слиться воедино (см. рисунок). Речь идет о том, чтобы во главе каждого стратегического плана стояла задача по разработке и выведению продуктовой инновации и/или освоению новых процессных технологий.

Именно поэтому уместно говорить не просто о корпоративной политике, а об *инновационной корпоративной политике*. Подтверждением вышесказанного служит то, что взаимопроникновение стратегического и инновационного управления может привести к тому, что, возможно, в будущем эти два вида менеджмента, один из которых (стратегический) сегодня относится к общему управлению, а другой (инновационный) – к функциональному, полностью интегрируются. Это предположение основано на том, что инновации все больше и больше определяют генеральную линию перспективного развития предприятия [4].

Еще одним доказательством будет являться общность функций стратегического и инновационного менеджмента в процессе управления предприятием, систематизация которых осуществлена по основным классификационным признакам (см. таблицу).

Таким образом, на основе выделенных функций стратегического и инновационного менеджмента в процессе управления предприятием и принимая во внимание наметившуюся в мировой экономике тенденцию перехода к инновационному типу развития экономики, можно сделать вывод о том, что в экономической теории и практике есть определенные предпосылки для интеграции двух типов управления [4].

К особенностям высокотехнологичных компаний следует отнести также кооперацию в ее широком понимании: научно-производственную, финансовую, информационную, институциональную, т. е. кооперацию форм собственности.

Кооперация национальных предприятий как эффективная форма их взаимодействия и структурной транс-

формации позволяет экономить ресурсы: природные, трудовые, производственные, финансовые и т. д.; повышать научно-технический уровень продукции и ее конкурентоспособность; осуществлять инновационное сотрудничество в целях технологического развития [6].

Высокотехнологичным компаниям крайне необходима интеграция в единые комплексы. Интеграция – это способ достижения большей устойчивости и эффективности такого комплекса. При решении интегративной задачи можно высказать два главных требования. Во-первых, если взять, к примеру, ракетно-космические предприятия (РКП), то они как составная часть военно-промышленного комплекса страны обязаны удовлетворять потребностям обороны и национальной безопасности, которые находят свое отражение в государственном оборонном заказе. Во-вторых, РКП как особо динамичная воспроизводственная структура должна быть способна к саморазвитию и самоорганизации в условиях рынка. В экономическом аспекте это требование означает, что предприятиям, выполняющим госзаказ, необходимо или стать самостоятельно рентабельными, или войти в состав более крупной, но рентабельной структуры. Только тогда можно решить задачи их инвестиционной привлекательности [3].

Интеграция будет развиваться только в том случае, если у предприятий возникнет в этом соответствующая внутренняя потребность и заинтересованность. Применение административного ресурса в этих случаях малоэффективно. Другое дело, что у значительной части российских предприятий потребности в интегрирующей надстройке нет, поскольку заказы с большим удовольствием получают именно они, а не специально создаваемые финансово-регулирующие надстройки в виде управляющих компаний интегрированных структур с неидентифицированными компетенцией и ответственностью, но своими интересами, зачастую лишь декларативно совпадаю-

Финансовое планирование	Долгосрочное планирование	Стратегическое планирование	Стратегическое управление	
Управление издержками ↘	Управление на основе экстраполяции прошлых тенденций ↘	Управление на основе предвидения изменений ↘	Управление на основе гибких экстренных решений →	Программирование стратегических инноваций →
1900–1950 гг.	1950–1970 гг.	1970–1990 гг.	1990 г. по настоящее время	
Управление лабораториями ↗	Корпоративное управление инновационными проектами ↗	Формирование корпоративного портфеля продуктовых новаций и инноваций ↗	Управление на основе совместно принятых решений →	
1 поколение НИОКР	2 поколение НИОКР	3 поколение НИОКР	4 поколение НИОКР	

Взаимопроникновение стратегического и инновационного менеджмента [4]

щими с интересами предприятий или государства. Роль такой «управляющей» компании всегда будет девальвирована, поскольку действует единственно прагматичное правило: если предприятие получает средства на выполнение заказа, то не следует передавать право распоряжения ими кому бы то ни было. Оправданным в этой ситуации будет создание управляющих компаний во главе с головными предприятиями, пользующимися доверием у сложившейся устойчивой кооперации, а также прове-

дение мероприятий по смене их менеджмента с целью приведения к управлению более грамотных и более молодых специалистов с системным пониманием рыночного хозяйствования. Управляющая компания, созданная на основе согласования интересов всех главных участников кооперации, сможет обеспечить и проведение рациональной научно-технической политики в холдинге, и эффективное конкурентное управление ресурсами, и оптимизацию состава предприятий холдинга.

**Общность функций стратегического и инновационного менеджмента
в процессе принятия управленческих решений**

Классификационный признак	Стратегическое управление	Инновационный менеджмент
Время действия	Осуществляется на период от 3 до 5 лет	Смена продуктового ассортимента должна осуществляться за период от 3 до 5 лет
Тип целей	Направлено на выявление путей долгосрочного выживания	Нацелено на разработку путей перспективного развития
Основные функции	Включает анализ, планирование, реализацию и контроль стратегической деятельности предприятия	Включает анализ, планирование, организацию и контроль инновационной деятельности предприятия
Учет факторов	Основными факторами, учитываемыми при разработке стратегии, являются глобальные изменения во внешнем окружении, размещение ресурсов и стратегия НИОКР	При принятии решений в отношении стратегии НИОКР необходимо рассмотреть такие стратегические факторы, как глобальные изменения во внешней среде, размещение ресурсов и корпоративную стратегию
Размещение ресурсов	Для реализации стратегии распределение ресурсов осуществляется на основе портфельного анализа	Выделение ресурсов для осуществления стратегии выведения новых продуктов на рынок целесообразно проводить в рамках портфельного анализа
Уровень управления	Разрабатывается высшим управленческим звеном	Осуществляется на высшем уровне организации
Система управления	Для большей эффективности необходимо создание группы стратегического развития	Для большей результативности целесообразно организовать специализированное инновационно-исследовательское подразделение
Степень важности	Выработанная стратегия является основным ориентиром для всей организации	Разработанная программа инноваций является одним из основных направлений общей стратегии предприятия, так как она определяет генеральное направление производственного развития
Характер осуществления	Необходимо осуществлять постоянно	Инновации целесообразно внедрять на постоянной основе

Холдинговая организация бизнеса обладает значительными адаптивными свойствами к изменениям (агрегации и дезагрегации) его структуры. Это позволяет в рамках их организационных возможностей концентрировать ресурсы на приоритетных направлениях. В настоящий момент в России функционирует несколько интегрированных структур подобного типа, например ФГУП «ГКНПЦ имени М. В. Хруничева», ОАО «РКК „Энергия” имени С. П. Королева» [3].

В данной работе мы лишь немного коснулись тех особенностей, которые существуют у высокотехнологичных компаний. Главный же вывод состоит в том, что инновационно-корпоративная политика для предприятия является основным направлением его экономического развития, потому что любое предприятие не должно стоять на месте, оно должно развиваться. А любое развитие может осуществляться только с внедрением инноваций. Вследствие этого они должны осуществляться не на тех-

нологическом или производственном уровне, а на корпоративном уровне. Именно поэтому инновационная корпоративная политика должна основываться на таких системных приоритетах, которые, с учетом взаимосвязанности с другими направлениями корпоративной политики, позволили бы организации не только поддерживать и сохранять конкурентные преимущества, но и усиливать их.

Библиографический список

1. Хрусталева, Е. Ю. Проблемы организации и управления в наукоемких отраслях экономики России / Е. Ю. Хрусталева // Менеджмент в России и за рубежом. 2001. № 1.
2. Багриновский, К. А. Проблемы управления развитием наукоемкого производства / К. А. Багриновский // Менеджмент в России и за рубежом. 2003. № 2.

3. Бендиков, М. А. Узловые проблемы развития высокотехнологического сектора российской экономики (на примере космической деятельности) / М. А. Бендиков, И. Э. Фролов // Менеджмент в России и за рубежом. 2003. № 6.
4. Коробейников, О. П. Интеграция стратегического и инновационного менеджмента / О. П. Коробейников, А. А. Трифилова // Менеджмент в России и за рубежом. 2001. № 4.
5. Трифилова, А. А. Методологические основы интеграции стратегического и инновационного менеджмента / А. А. Трифилова // Менеджмент в России и за рубежом. 2004. № 3.
6. Багриновский, К. А. Некоторые подходы к совершенствованию механизма управления технологическим развитием / К. А. Багриновский, М. А. Бендиков // Менеджмент в России и за рубежом. 2001. № 1.
7. Колесников, С. «Экономический учет» или что такое «управленческий учет» в современном понимании / С. Колесников // Управление компанией. 2002. № 8.
8. Иванов, В. Н. Проблемы корпоративного управления в высокотехнологичных организациях / В. Н. Иванов, В. В. Тучкова // Инновации. 2000. № 9–10.
9. О стимулировании инновационной деятельности и внедрения в производство наукоемких технологий: доклад Минпромнауки России на заседании Правительства РФ 22.01.04 // Официальный сайт Правительства РФ. [Электронный ресурс]. Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.government.gov.ru/>. Загл с экрана.

A. V. Vorozhtsov, L. M. Mukoed

INNOVATIVE CORPORATE POLICY OF THE HI-TECH ENTERPRISES

The article shows corporate policy's directions and content at Hi-tech enterprises viewed as innovative development tasks.

О. В. Гостева

ОБУЧЕНИЕ ПЕРСОНАЛА – ПЛЮСЫ И МИНУСЫ СОВРЕМЕННОЙ РОССИЙСКОЙ ДЕЙТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрена проблема непрерывного обучения и его содержания при переобучении персонала, особенно топ-менеджмента в России с позиции различных типов социальности. Показано, что западная парадигма требует переосмысления в соответствии с реальным историческим развитием нашей страны.

Еще в 70-е гг. XX в. в западных странах была разработана концепция непрерывного образования, которую называют одним из самых эффективных инструментов, позволяющих решать проблемы соответствия быстро растущего технического потенциала и квалификации персонала. Концепция предполагает, что процесс профессионального развития становится постоянным, специалист в рамках самой деятельности и на специальных курсах получает новые знания, необходимые для поддержания собственной работоспособности.

Уже в 80-х гг. американские корпорации расходовали на образование и профессиональную переподготовку огромные средства, а на их предприятиях обучалось 8 млн человек – примерно столько же, сколько в вузах США. 75 % фирм обеспечивала занятый у них персонал программами профессиональной подготовки.

Но несмотря на все эти показатели, в американской системе непрерывного образования существуют серьезные проблемы. «В конкурентоспособной стране, – пишет Дж. Грейсон, – ее гражданам необходимо иметь: высокий средний уровень функциональной грамотности (чтение, письмо, общение); основные знания в области математики, статистики, научной методологии; способность наблюдать процессы, анализировать их, интерпретировать результаты и предпринимать действия; знания о мире; умение работать в коллективе; способность нести ответственность; постоянно учиться и приспосабливаться к изменениям.

Заметьте, в этом списке – не только математика, естественные и технические науки, вокруг которых в основном идет сейчас разговор. Сюда же попали основы общей грамотности, межличностные и мировоззренческие вопросы, знания о мире (география, история, экономика, языки). В большинстве этих вопросов США не дорабатывают: система образования не производит ни хорошо образованных граждан, ни профессионально подготовленную рабочую силу» [3].

В российской системе образования ситуация еще более сложная. Самая главная проблема состоит в том, что мы устремились за Западом и забыли о самобытности и неповторимости русской культуры, а следовательно, и образования. Это касается не только академического, но и дополнительного образования.

Но, к примеру, в Японии культ учебы существует не только в школе. Он сохраняется всю жизнь и выражается в интенсивных внутрифирменных и внутриминистерских программах обучения, в обучении дома и в повседневной жизни. Дж. Грейсон отмечает: «Основным источником конкурентоспособности Японии является система образования, мотивация, способность перестраиваться,

меньшая острота конфликтов в обществе, внимание к производительности труда и качеству» [3]. В результате средний японец лучше подготовлен, чем средний американец. Уровень же образования среднего россиянина никто не измерял.

Рассматривая важность процесса непрерывного образования в целом, необходимо иметь в виду, что эффективность процесса обучения зависит от успешности каждого отдельного мероприятия. Кумулятивный эффект обучения не может быть получен, если вы заранее не составили представления о целях и типах программ обучения, а также об особенностях коммуникативного процесса слушателей и преподавателей.

Можно выделить три типа учебных занятий в рамках последипломного образования:

– передача знаний, или сохраняющее обучение. Его целью является усвоение фиксированных взглядов, методов и правил для того, чтобы эффективно работать в известных и повторяющихся ситуациях для решения насущных проблем. Предназначено для поддержания существующей системы деятельности;

– формирование определенного арсенала умений, развитие потенциала работников, или инновационное обучение. Оно ориентировано на перспективу, подготовку к работе в новых условиях, имеет дело с уникальными проблемами, которые невозможно решить методом проб и ошибок, сама формулировка которых требует иных навыков. Административный и управленческий персонал обычно хорошо подготовлен к сохраняющему обучению, но это часто оказывается мало для его развития;

– не так давно заговорили о развитии еще одного типа обучения, ориентированного в основном на топ-менеджмент. Его можно назвать мировоззренческим. Запрос на подобное обучение поступает от самих практиков. Он возникает, когда руководители не могут понять причины происходящего, когда они осознают узость собственного мышления.

В своей статье «Чему не учат в бизнес-школах» Ч. Хенди пишет: «Для топ-менеджера, ставшего уже хорошим специалистом, на первый план выходят проблемы за пределами организации, проблемы, находящиеся вне его контроля. Было бы здорово открыть бизнес-школу и рассказать там о таких вещах, которым в обычной школе не учат. Там можно было бы помочь слушателям разобраться в вещах, выходящих за рамки повседневной деятельности компании, таких как международная политика, история, новое научное мышление, демография и феминизм, вплоть до современной религии, этики и философии. Менеджеры прекрасно разбираются в теории бизнеса, но настолько

заняты на работе, что забывают о более широком круге вопросов. Иными словами, ближе к вершине для решения совершенно нового спектра проблем им необходимы творческие, концептуальные навыки.

В учебниках по менеджменту решений этих проблем нет. Университетские деятели весьма скептически относятся к таким предложениям. Раньше никто ничего подобного не делал, но и мир не менялся настолько стремительно и столь непоследовательно» [5].

Самое важное, что философские вопросы все более волнуют именно высший менеджмент. Когда фирма устойчива на рынке и достаточно стабильно развивается, ее руководители начинают смотреть на перспективы, вопросы морали, нравственности, развития, общественной ответственности. К сожалению, современная наука слишком дискретна и те знания, которыми обладают философы, разработаны в узко специфических направлениях и имеют слишком отдаленный прикладной эффект.

Еще в XVIII в. Ж. О. де Ламетри писал: «Если организация человека является первым его преимуществом и источником всех остальных, то образование предстает как второе его преимущество. Без образования наилучшим образом организованный ум лишается всей своей ценности». Кто же и как должен совместить зреющий запрос менеджмента как в отношении персонала, так и в отношении саморазвития?

Если мы рассматриваем связку «вузы – компании – выпускники» с точки зрения маркетинга, то возникает вопрос: что мы продвигаем? Скорее всего, это знания. Но можно ли ограничить знания только техническими навыками? Высшее образование дает не только специалистов в какой-либо узкой области знаний, но и людей, принимающих решения, формирующих настоящее и будущее. Как мы знаем, решения принимаются как на базе технических знаний, так и на базе нравственного выбора, а именно об этой стороне вопроса перестали даже упоминать.

Кого мы подразумеваем под потребителями интеллектуального продукта и его носителями? Выпускников вузов? Или работодателей, какие-либо компании? Но это – слишком узкое понимание вопроса. Главным, основным потребителем является общество и именно о его стабильности, развитии и процветании должны заботиться вузы. Поэтому философскому осмыслению данного вопроса необходимо уделить гораздо больше внимания. Н. М. Чуринов пишет: «Со времен немецких классических философов разрабатывается идея конца истории. В главном историческая идеология конца истории определяется как характеристика начала всеобщей технологизации общественной жизни, когда посредством социальных и иных технологий инспирируются социальные процессы, разыгрываются партии на „мировой шахматной доске” и к власти приходят временщики, которые работают за деньги, а не на совесть. Ими насаждается тенденциозная историческо-идеологическая мифология и т. д.» [6].

В западном правовом государстве основой являются только нормы права, все иные аспекты: мораль, нравственность, духовность – значимы только тогда когда они совпадают с нормами права. Как только они (например, мораль или нравственность) вступают в противоречие с нормами права, их перестают учитывать как значимый

элемент. «Закон превыше всего, разрешено все, что не запрещено» – такова западная социальная реальность. Для России же совесть, нравственность, духовность исторически были ведущими основами, на которых базировались законы. И если закон входил с противоречием с нравственностью, то переосмысливался закон, а не нравственное начало.

Когда зарубежные авторы говорят о корпоративной культуре, о внутрикорпоративном климате, человеческом ресурсе, они понимают их чисто механически, технологически и потребительски, рассматривая эти понятия только с точки зрения увеличения или стабилизации прибыли. Для России такое понимание человека было всегда чуждым. Н. М. Чуринов отмечает: «Современная Россия действительно переживает конец истории в том смысле, что правят страной имиджмейкеры, политические программисты и социальные технологи» [6].

Необходимо остановить этот процесс, и начинать это нужно в вузах. Еще Б. Н. Чичерин в конце XIX в. отмечал, что сила власти не исчерпывается материальными средствами: «...надобно, чтобы к этому присоединился духовный элемент, тот нравственный авторитет, который привлекает к правительству доверие и уважение народа» [4]. К сожалению, современные вузы не рассматривают нравственное воспитание молодежи в качестве ведущего.

Приведем еще одну цитату из Б. Н. Чичерина: «Было время, когда русские университеты стояли высоко и по своему составу, и по своему влиянию на общество. Московский университет был центром, откуда распространялся свет по всей русской земле. Из университетов выходили молодые люди, исполненные жаждой знаний с идеальными стремлениями.

После реформ университеты утратили свой авторитет и не могли уже поддерживать волнуемую молодежь, исполненную благородных стремлений, но лишённую всякой основательной подготовки и всякого разумного руководства. Молодежь еще менее могла способствовать правильному развитию русской общественной жизни.

Но каково бы ни было материальное положение русского народа, он и из него выйдет, когда будут сняты опутывающие его узы, ибо это народ смысленный и трудолюбивый. Несравненно хуже то нравственное зло, которое разъедало несчастную русскую землю, проникая во все сферы, отравляя лучшие ее силы и искажая великие свершения народа... Вся судьба русского юношества и русского просвещения была отдана на жертвы самым низким личным целям. Все нравственное существо человека возмущается против порядка вещей, в котором возможны подобные явления... Из всех отраслей государственного управления народное просвещение есть то, которое требует наибольшей последовательности, осторожности и умения. Надобно приучить юношей к умственной дисциплине, приобрести над ними нравственный авторитет, внушить им уважение к их руководителям. В этой области всего вреднее колебания в ту или другую сторону, смены строгости и распушенности; менее всего допустимы радикальные перевороты.

Все старое уничтожилось, а новое не было создано, да и не могло быть создано, ибо оно противоречило существующим условиям. Одно за другим выпускались

поколения с полным хаосом в умах... Ничто не могло исцелить того нравственного расстройств и унижения, которые были произведены. Корпоративные связи были разрушены, нравственный авторитет подорван. Профессора превратились в чиновников, обязанных читать лекции. В итоге молодежь потеряла всякое доверие как к близкой, так и к отдаленной власти» [4].

Как ни странно, но положения, написанные более 100 лет назад, остаются такими же актуальными и сейчас. Кажется, что они написаны о современных проблемах (не хватает только знакомых понятий: глобализация, международные проекты и т. д.).

Для высшего образования важна передача не только информации, но и нравственных основ – живого примера высокого служения. Историческое сознание формируется на основе определенных способов самоутверждения социумов. В этой связи складываются традиционный для данных социумов роды занятий, соответствующие специализации и разделению труда, устанавливается соответствующий тип духовной жизни и отношений внутри социумов, особенности духовного и материального производства и т. д.

Осмыслением различных типов обществ занимались как отечественные философы (И. В. Киреевский, А. С. Хомяков, Ю. Ф. Самарин, представители советской философии, а также современные исследователи: А. М. Ковалев, Н. М. Чуринов, А. С. Панарин), так и западные философы (Д. Юм, Ж.-А. Кондорсе, Г. Спенсер и др.).

«Историческое сознание, – пишет Н. М. Чуринов, – формируется на основе определенных способов самоутверждения социумов. В этой связи складываются традиционные для социумов роды занятий, соответствующие для каждого из них (социумов) специализации и разделению труда, устанавливается соответствующий тип духовной жизни и отношений внутри социумов, особенности духовного и материального производства и т. д. ... Отметим, что Маркс фактически игнорировал необходимость изучения способов самоутверждения социумов. Согласно ему, историческое сознание исследуется независимо от типа общества, типа социума, народа и т. д. ... Тем самым грубо искажается и примитивизируется содержание объективной диалектики жизни общества, гипертрофируются стандарты индивидуалистического общества» [6]. Соответственно привнесенные западные теории, начиная с марксистских, не могли подходить для российских условий.

С XVII в. западные философы-теоретики целенаправленно формировали универсальное, единственно пригодное для всех народов представление об индивиду-потребителе и утилитарном обществе. Различные виды автономии и, прежде всего, автономия личности, потребительские по своей сути, провозглашаемые в качестве идеалов прогресса, обозначали неминуемый уклон в индивидуалистический эгоизм и своеволие, которые могут обуславливать единственно стремление индивида к удовлетворению своих потребностей. Мотивация поведения человека обосновывается стремлением к получению удовольствий, наслаждений и пользы, т. е. к утилитаристскому потреблению. Свобода воли начинает рассматриваться прежде всего как потребительская свобода, устанавли-

вающая не ограниченный напоминаниями о долге индивидуалистический гедонизм. Западное общество постепенно начинает раскрывать себя как «общество потребления». Разрабатываются соответствующие концепции индустриального и постиндустриального обществ, в которых существенная роль отводится НТР, повышению производительности труда и, тем самым, уровня жизни.

«Общество потребления» успешно функционирует в случае удовлетворения его постоянно возрастающих запросов. Учитывая естественную ограниченность ресурсов, удовлетворяющих потребительские запросы, возникает вопрос о том, что предпочесть: ограничить свои запросы либо найти источник их удовлетворения вовне. Утилитаристский прогресс предполагает исключительно второй вариант решения. «Общество потребления» превращается в агрессивное, воспроизводящее и превосходящее милитаризм. Желание неумного потребления, получения скорой наживы приводит к многочисленным агрессивным актам западных государств по отношению к другим странам.

Наглядно ценностный подход демонстрируется на примере деятельности служб маркетинга и рекламы в СМИ, которые играют едва ли не ключевую роль в процессе создания искусственных ценностей и потребностей. Любое, едва заметное, изменение потребительского товара искусственно и весьма умело позиционируется как новая ценность, обладание которой «жизненно необходимо» индивиду.

Утилитаристский прогресс индивидуалистического, западного общества детерминируется в первую очередь принципами индивидуализма и свободы воли. Основными чертами выступают следующие положения:

- акцентированное внимание на процессах формирования, развития, рационализации, удовлетворения, роста и возвышения потребностей;
- уровень потребления как критерий прогресса;
- мотивация деятельности индивида на удовлетворение собственных потребностей;
- универсализация потребления;
- оправдание состояния вражды как следствия борьбы за материальные блага (классовая борьба, борьба в обществе за статус, рыночная конкуренция и т. д.).

Российское общество исторически сложилось как коллективистское, оно функционировало и функционирует в сложных географических, климатических условиях. Огромные по размеру не освоенные территории, преимущественно с суровым климатом, требовали и в настоящее время все еще требуют закрепления на них населения в целях организации хозяйственной деятельности, воспроизводства общественной жизни. В таких условиях существенное значение приобретает принцип следования объективным законам развития природы. Н. А. Умов писал: «Естественное знание открывает нам, что мы и окружающие нас вещи окутаны сетью, как рыба неводом, что эта сеть тянется и в далекое прошлое, и в далекое будущее. Своими свободными и при незнании строения сети, в сущности, бессвязными движениями мы дергаем ее и спутываем, причиняя ненужные страдания не только своим соседям, находящимся в том же положении, как и мы, но и далекому потомству и рефлекторно самим себе. Эта сеть делает

ближними не только всех нас между собою и с нашим потомством, но и со всем живым миром, и углубляет само понятие ближнего... Отсюда свобода человека состоит не в стремлении вырваться из сети всеобщей связи, а в освоении диалектики необходимости и свободы, причем объектами освоения всеобщей связи оказываются системность, организованность, упорядоченность и другие проявления стройности, а мерами законченности стройности – совершенство, гармония, красота».

Российское общество изначально строилось на коллективистических основах, на принципах совершенства общественных отношений. А. С. Панарин дает этому следующее объяснение: «...западники постоянно сетуют на устойчивость русского культурно-антропологического типа, характеризующегося неритмичностью трудовых профессиональных усилий, гражданской пассивностью, „холопской покорностью”. Но если на большей части территории снег лежит до полугода, то аграрный цикл сжимается до 5 месяцев, что исключает межсезонную ритмичность усилий, требует их необычайной концентрации в особое время года» [1].

Отсюда исходит невозможность реализации естественного для индивидуалистического общества «состояния вражды», конкурентной борьбы (особенно внутрфирменной конкуренции). Коллективистическое общество функционирует в особо сложных условиях, в результате чего основные силы общества поглощают процессы приспособления к условиям окружающей среды, освоения территории, закрепления населения, воспроизводства общественной жизни, организации хозяйственной деятельности. Коллективистическое общество успешно, если оно подстраивается под действие законов развития природы и находит социальную нишу для функционирования по принципу гармоничного с ней взаимодействия, что является одной из сторон развертывания совершенства общественных отношений. Гармоничное развитие между обществом и природой – лишь одна из составляющих процесса совершенствования общественных отношений, к другим составляющим относятся совершенствование межличностных отношений, отношения между индивидом и обществом, между социальными группами, общностями, конфессиями и т. д.

Социальный прогресс коллективистического типа общества увязывается с уровнем (степенью) совершенства общественных отношений, что выступает его критерием, направленностью жизнедеятельности общества на гармонизацию и совершенствование общественных отношений. На объективное существование такого критерия, как степень совершенства, обращали внимание Ж. Тюрго, Ж. А. Кондорсе, О. Конт, а также представители русской философии: А. С. Хомяков, А. С. Панарин и др. Р. В. Петропавловский отмечал: «Поскольку в качестве совершенства может выступить нечто высшее, постольку движение к нему, бесспорно, составляет прогресс, а степень совершенства можно считать критерием прогресса» [1]. В случае прогресса происходит достижение более высокого, совершенного уровня общественных отношений, проявлением которого может служить то, насколько успешно и позитивно разрешаются встающие перед обществом проблемы.

При таких условиях процессы, происходящие в обществе, идут в соответствии с объективными законами развития общества и природы, причем развитие общественных отношений развертывается как их объективная диалектика. Именно об этих различиях интуитивно догадываются практикующие менеджеры. Они на уровне своей деятельности неоднократно убеждались в несоответствии западных теорий российской действительности. Необходимо совместить опыт практиков с тем пониманием развития общества, к которому все более явственно приходят исследователи и о котором в свое время писали русские философы.

Современная система обучения в области менеджмента базируется на западных теориях, концепциях и парадигме. Мы старательно перенимаем западный опыт, забывая о своих источниках, российской самобытности. При этом на Западе начинают понимать, что его культура не единственная, хотя попытка глобализации очередной раз показывает обратное. Дж. Грейсон пишет: «На самом деле американцы просто не могут представить себе, чтобы не западная страна лидировала в мире. У них есть символическая, едва скрываемая уверенность, что страны Азии не способны к достижению западного уровня жизни или мышления... Возможно ли, чтобы Япония и другие азиатские страны вывели какую-то особую модификацию капитализма – некий „азиатский подвид”, который оказался лучше чем его американская версия? П. Бергер считает, что азиатские страны создали нечто новое. Это он называет „вторым вариантом”. Этот путь не является простым развитием капитализма западного, а чем-то принципиально иным и, вероятно, чем-то лучшим.

Азиатская версия капитализма, хотя во многом и похожа на западную, все-таки отличается от нее и ставит под сомнение ряд основных принципов. Японцы построили капитализм, не основанный на западной идеологии. Они использовали свои сильные стороны: высокую норму сбережений, элитную государственную бюрократию, партнерскую систему отношений в бизнесе и социально однородное общество. Кроме того, они развили традиционные взгляды на приоритет личных отношений и взаимных обязательств над правами. Соответственно предрассудок, что государство и индивидуум являются соперниками, отнюдь не занимает центрального места в их философии. Они не считают разбирательство конфликтов лучшим способом устранения расхождения между людьми. Государство здесь играет более активную роль, не управляя экономикой и не планируя ее, а работая с частным сектором» [3].

Опыт Восточной Азии говорит и о неверности тезиса о том, что большая степень государственного вмешательства в экономику несовместима с успешным капиталистическим развитием. Основатель компании «Хонда моторс» Т. Фудзикава говорил: «Японская и американская системы управления одинаковы на 95 % и отличаются во всех важных пунктах». Разница едва заметна, иногда даже эфемерна: целое больше чем части, его составляющие; единство превосходит разногласия; «и–и» лучше, чем «или–или»; взаимосвязи более важны, чем различия. Если использовать язык гештальт-психологии, то жители Запада ищут смысл в фигуре, хотя главное заключается в фоне.

«Таким образом, – говорит Т. Халберстем, – наш в высшей степени творческий, индивидуалистический капитализм противостоит чему-то совершенно иному, капитализму Японии, руководимому государством».

Мы видим на примере Японии, что существует возможность становиться экономически развитыми, выходить на мировые рынки и при этом сохранять свою природную самобытность, найти методы развития, отличающиеся от западных, но при этом достигать не менее высоких результатов. Следовательно, именно в этом направлении необходимо прикладывать основные усилия, найти способ развития, с помощью которого мы сможем сохранить и развить достоинства нашего «азиатского», коллективистического типа общества, дать высокие экономические показатели. Основой подобного прогресса являются профессионалы-практики, которые хотят получать знания и с готовностью получают дополнительное образование. Дать такое образование – наша задача.

Анализ «азиатского капитализма», проведенный американскими исследователями, показал следующее:

– существует принципиально иное построение взаимоотношений в обществе;

– на основе этих взаимоотношений можно построить серьезное конкурентоспособное экономически развитое общество;

– различия находятся не во внешней системе управления, а во внутренних, социальных основах общества;

– простой перенос одной системы в другую практически невозможен;

– необходимо глубоко изучить опыт как одного, так и другого типов общества, при этом все процессы необходимо рассматривать с позиции типа общества и его особенностей;

– при обучении менеджеров, особенно высшего управленческого звена, необходимо также учитывать различие типов общества, их особенности развития.

Еще раз обратим внимание на следующие положения:

– специалисты различных направлений все чаще подчеркивают наличие как минимум двух типов общества: индивидуалистического и коллективистического, основанных на принципиально разных социальных основах;

– одинаковые теории, применяемые в различных обществах, дают принципиально различные результаты;

– многие теории (и практики), напрямую заимствованные у Запада, не работают в России, так как не учитывается тип общества и особенности взаимодействия в нем;

– при изучении любой теории, а особенно при обучении топ-менеджмента, необходимо подразделять теории и типы общества, так как это имеет принципиальное значение для понимания происходящих процессов;

– необходимо более глубокое осмысление российского опыта, в том числе в экономике и управлении, с точки зрения социальности коллективистического общества.

Библиографический список

1. Антонов, Д. А. Основные типы общественного прогресса / Д. А. Антонов // Теория и история. 2004. № 2. С. 58–66.

2. Базаров, Т. Ю. Управление персоналом / Т. Ю. Базаров, Б. Л. Еремин. М.: ЮНИТИ, 2001.

3. Грейсон, Дж. Американский менеджмент на пороге XXI века / Дж. Грейсон. М.: Экономика, 1991.

4. О свободе. Антология мировой либеральной мысли / под ред. И. М. Андреева. М.: Прогресс-Традиция, 2000.

5. Хенди, Ч. По ту сторону уверенности / Ч. Хенди. СПб.: Питер, 2002.

6. Чуринов, Н. М. Историческая идеология и историческое сознание / Н. М. Чуринов // Теория и история. 2004. № 2. С. 3–11.

О. V. Gosteva

LEANING PERSONAL – PLUS AND MINUS IN HISTORICAL DEVELOPMENT OF RUSSIA

The problems of continues learning and its matter is studied. The article shows that western theories which are the basis of the staff training program must be revised according to real historical development of Russia and its social setting.

Д. В. Еремеев

ОСОБЕННОСТИ ФИНАНСОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОПЕРАТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Представлены основные положения, необходимые для успешного оперативного финансового планирования на предприятии. Анализ основных факторов, проведенный на основании метода экспертных оценок, позволил выбрать наиболее важные из них, на которые необходимо обратить внимание при оперативном планировании.

На разработку оперативного финансового плана промышленного предприятия существенное влияние оказывает специфика отрасли, внешняя и внутренняя среда функционирования организации.

Одной из самых важных отраслей народного хозяйства в нашей стране является машиностроение – крупнейшая отрасль материального производства, в которой создаются орудия труда, преобладающая часть предметов труда и товаров народного потребления. Машиностроение оказывает серьезное влияние на формирование производственных отношений в нашей стране. Техническое оснащение всех отраслей народного хозяйства служит основой роста производительности труда и увеличения масштабов производства.

Машиностроение, являясь ведущей отраслью промышленности, отличается от других ее отраслей характером применяемых машин, предметами труда, ролью и значением в народном хозяйстве. Это определяет структуру машиностроения, специализацию производства и его связь с другими отраслями, структуру затрат в отрасли, состав и структуру фондов. Машиностроение – база технического перевооружения всего общественного производства. От развития машиностроения зависят масштабы и темпы внедрения современного прогрессивного оборудования, уровень механизации и автоматизации производства во всех отраслях промышленности, сельского хозяйства и транспорта.

Анализ научных и практических исследований машиностроительной отрасли [1; 2; 3; 4] позволил выделить отличительные особенности российского машиностроительного предприятия.

С точки зрения характера технологии и организации производства, производственная структура отечественных машиностроительных предприятий, сложившаяся к настоящему времени, характеризуется высочайшей концентрацией и масштабом производства, наличием многоплановых, громоздких линий, охватывающих весь процесс производства, множественностью технологических операций, длительностью производственного и коммерческого циклов. Данная ситуация может быть охарактеризована как конфликт между производственным способом рыночного существования, получившим свое развитие в 20–30-х гг. прошлого столетия именно на крупных машиностроительных объединениях США и Западной Европы, и современными товарными и социально-этическими концепциями вхождения в рынок.

Существенной особенностью машиностроения следует считать постоянно увеличивающиеся темпы изменения потребностей в продукции машиностроения, свя-

занных с революционным влиянием развивающегося научно-технического прогресса. С учетом жесткой конкурентной борьбы от машиностроительного предприятия требуется постоянный контроль и прогнозирование жизненного цикла новой продукции. Преимущества перед конкурентами достигаются за счет более совершенной технологии разработки проектов и внедрения новой продукции, осуществляемого путем максимального сокращения исследовательской, предпроектной и подготовительной фаз развития проекта. Указанная ситуация должна разрешаться посредством установления баланса между потребностью массового выпуска изделий машиностроения и требованиями к предельной гибкости используемых технологических процессов.

Наличие большого количества разноплановых технологических операций влечет за собой необходимость инвестиционных действий по всем направлениям производственного комплекса. Инвестиционная деятельность, связанная с внедрением новой продукции на машиностроительном предприятии, не может осуществляться за счет внесения изменений в одну технологическую операцию. Предприятию необходимо внедрять различные нововведения, зачастую не связанные между собой, что в свою очередь требует привлечения научно-технического потенциала из противоположных научных сфер.

Одной из специфических особенностей готовой продукции машиностроительного предприятия следует считать высокую степень наукоемкости и конструктивной сложности окончательного продукта. В этой связи на первый план выходит научно-исследовательская и опытно-конструкторская стадии жизненного цикла. К научному потенциалу предприятия должны быть предъявлены особые требования. Финансовая составляющая процесса выпуска нового продукта (расходы на НИОКР в отношении к объему продаж) в передовых машиностроительных фирмах Запады достигает, по данным зарубежных исследователей, 7...10 %, что позволяет предприятиям оставаться безусловными лидерами в своих отраслях.

Активная финансовая деятельность, высокая степень наукоемкости и конструктивной сложности окончательного продукта на машиностроительном предприятии невозможны без наличия мощного кадрового потенциала (сложившихся научных команд во главе с признанными лидерами-экспертами) и развитой материально-технической и исследовательской деятельности, количественная величина которой может быть определена путем сравнения стоимости экспериментально-лабораторной базы и основных активов фирмы.

Отраслевые особенности машиностроительного предприятия оказывают существенное влияние на содержание оперативного финансового планирования и совокупность задач его составляющих. Из особенностей машиностроительной отрасли, оказывающих наибольшее влияние на процесс оперативного финансового планирования, можно выделить следующие: длительность производственного, коммерческого циклов, инвестиционного процесса; специфический характер готовой продукции, технологии и организации производства, сложившихся условий управления и др.

С точки зрения автора, на процесс оперативного финансового планирования наиболее существенное влия-

ние оказывает длительность производственного и коммерческого циклов машиностроительного предприятия. Из-за длительного периода времени, необходимого для изготовления и продажи готовой продукции, у предприятия образуется недостаток денежных средств для финансирования текущих потребностей, что негативно отражается на его финансовом состоянии и может привести к банкротству. В настоящее время машиностроительные предприятия частично решают проблему недостатка денежных средств путем проведения прямых товарообменных операций и длительного товарного кредита, взятого у контрагентов. Автором была построена диаграмма причинно-следственных связей (рис. 1), являющаяся знако-

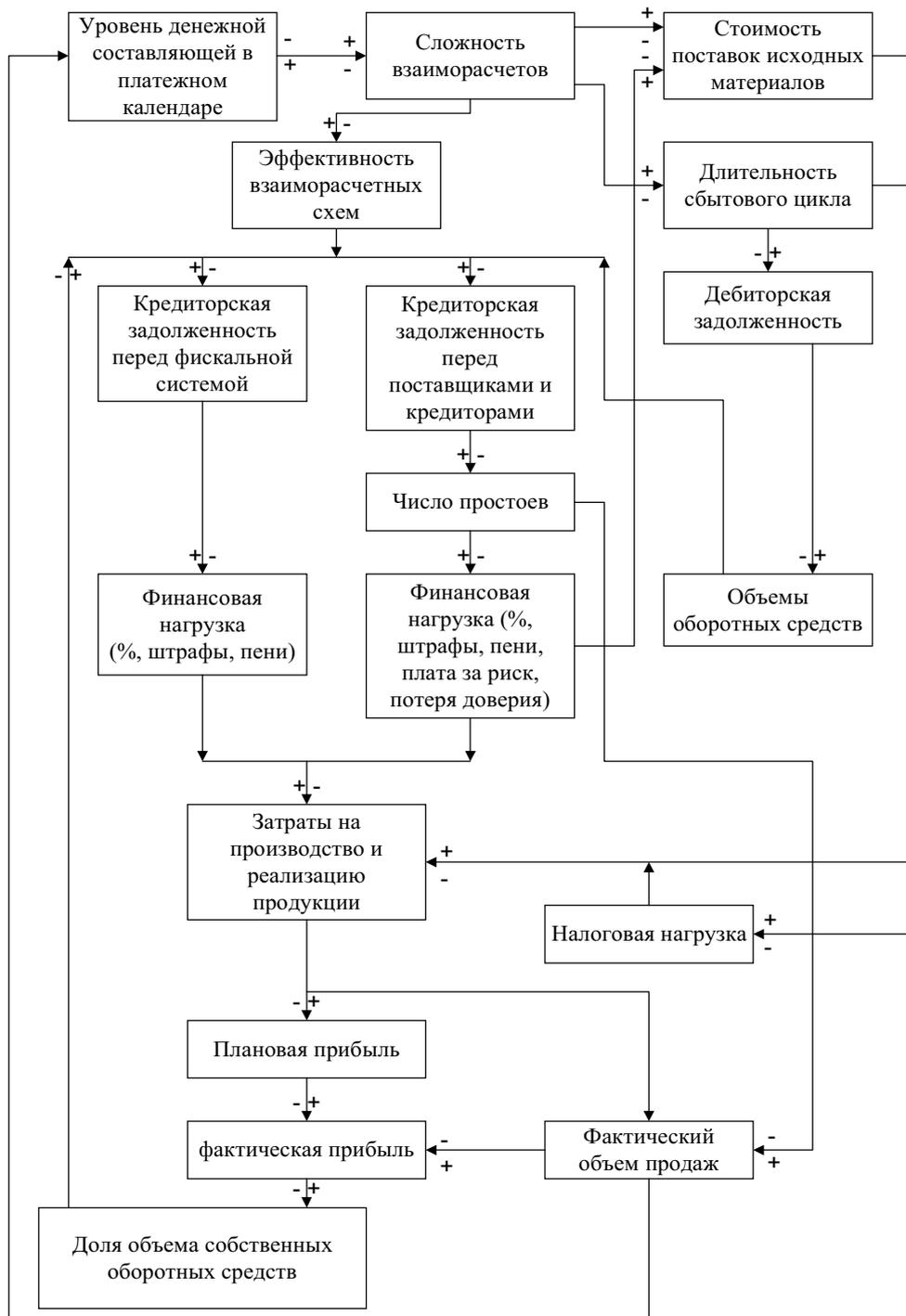


Рис. 1. Диаграмма причинно-следственных связей в оперативном финансовом планировании

вой моделью оперативного финансового планирования и позволяющая определить взаимосвязи внутренних факторов и влияние их друг на друга при разных уровнях денежной составляющей в платежном календаре. Данная диаграмма имеет циклическую форму, так как процесс оперативного финансового планирования на предприятии заканчивается только при его ликвидации. При анализе этой диаграммы необходимо отметить, что низкий уровень денежной составляющей пагубно влияет на общее финансовое состояние предприятия, значительно увеличивая себестоимость реализуемой продукции и делая ее неконкурентоспособной.

Для понимания причин возникновения низкого уровня денежной составляющей в платежном календаре необходимо выявить факторы, оказывающие наиболее сильное влияние на процесс оперативного финансового планирования на машиностроительном предприятии. С этой целью автором был проведен экспертный опрос с использованием метода ранговой корреляции. Основные данные, полученные в ходе его проведения, представлены в таблице. Для оценки коэффициента конкордации сгруппируем данные (рис. 2). Коэффициент конкордации, равный 0,774, говорит о наличии высокой степени согласованности мнения экспертов.

На основании результатов экспертного опроса была проведена классификация факторов, оказывающих влия-

ние на процесс оперативного финансового планирования (рис. 3).

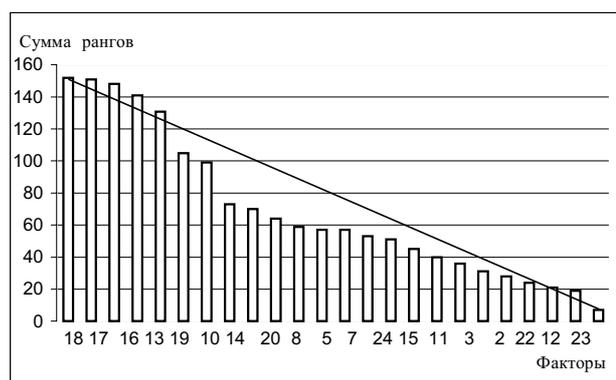


Рис. 2. Гистограмма распределения сумм рангов существующих факторов

Группировка факторов на входные и выходные позволяет сформировать систему показателей, составляющих критериальную базу для принятия решения в рамках оперативного финансового планирования. Группировка факторов на внешние и внутренние выявляет источники и форму влияния факторов на объект исследования. Классификация по степени регулируемости помогает определить группу показателей, на которые может быть направлено управляющее воздействие со стороны предприятия.

Матрица рангов по степени релевантности

Фактор	Эксперт							Сумма по строкам
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
Сальдо денежных средств	1	1	1	1	1	1	1	7
Объем кредита	7	6	5	7	8	6	6	45
Срок кредита	7	7	6	8	10	7	6	51
Реструктуризация кредиторской задолженности	2	3	4	3	3	2	2	19
Структура портфеля ценных бумаг	9	10	9	8	9	10	9	64
Угроза банкротства	3	2	4	2	3	4	3	21
Объем ценных бумаг	8	9	9	10	8	7	8	59
Размер пени и штрафов	10	11	10	9	11	10	9	70
Реструктуризация дебиторской задолженности	2	5	4	3	5	3	2	24
Стоимость залога по кредиту	15	13	17	16	14	18	12	105
Ставки доходности фондового рынка	8	10	5	6	9	7	8	53
Ставки кредитования коммерческими банками	5	7	8	3	4	5	4	36
Ставки доходности на валютном рынке	20	22	15	18	24	23	19	141
Процентная ставка по депозиту	14	15	11	16	12	13	18	99
Ликвидность ценных бумаг	8	10	6	11	9	5	8	57
Уровень развития экономики и отрасли	21	18	24	22	19	23	21	148
Уровень развития рыночной инфраструктуры	22	24	19	21	23	22	20	151
Ставка рефинансирования ЦБ	23	20	21	24	19	22	23	152
Срок гашения ценных бумаг	17	19	20	15	14	18	19	122
Транзакционные издержки	10	15	8	9	11	12	8	73
Показатели платежеспособности	4	6	3	5	2	5	3	28
Формирование структуры портфеля альтернатив	5	8	7	4	7	4	5	40
Объем остатка денежных средств	4	4	5	3	2	6	7	31
Норматив абсолютной ликвидности	7	9	6	10	10	9	6	57
Сумма по столбцам	233	256	230	238	242	248	234	1653

Принимая во внимание, что характер информации оказывает существенное влияние на метод принятия решения, была также проведена классификация по характеру используемой информации. Среди рассматриваемых показателей более 60 % факторов имеют неопределенный или стохастический характер информации, что ставит под сомнение использование детерминированных методов принятия решения. При принятии того или иного решения в процессе оперативного финансового планирования необходимо использовать методы, разработанные в теории вероятности и математической статистики, или методы, предлагаемые теорией игр.

Оценка по степени релевантности позволяет выявить факторы, оказывающие основное воздействие на процесс оперативного финансового планирования машиностроительного предприятия. К этим факторам (степень их релевантности больше 0,7) относятся следующие:

- сальдо денежных средств, рассчитываемое на основе платежного календаря;
- объем ценных бумаг, находящийся в собственности предприятия;
- структура портфеля ценных бумаг, которым владеет предприятие;
- объем возможного получения кредита в банке или в финансовой компании;
- срок, на который банк или финансовая компания может предоставить предприятию кредит;
- ликвидность ценных бумаг, которыми владеет предприятие;
- ставки доходности фондового рынка, необходимые для оценки возможного дохода при вложении предприятием временно свободных денежных средств;
- транзакционные издержки, связанные с куплей-продажей ценных бумаг;
- ставки кредитования предприятия коммерческими банками;
- реструктуризация дебиторской задолженности;
- реструктуризация кредиторской задолженности;

- размеры штрафов и пеней за несвоевременное исполнение своих обязательств;
- угроза банкротства для предприятия;
- показатели платежеспособности;
- формирование структуры портфеля альтернатив;
- объем остатков денежных средств;
- норматив абсолютной ликвидности.

Факторы, имеющие менее выраженное влияние на процесс оперативного финансового планирования (степень релевантности 0,4...0,7), следующие:

- стоимость залога по кредиту;
- процентная ставка по депозиту.

Факторы со степенью релевантности менее 0,4 – ставка доходности на валютном рынке, уровень развития экономики и отрасли, уровень развития рыночной инфраструктуры, ставка рефинансирования ЦБ, срок гашения ценных бумаг.

За счет вышеперечисленных факторов формируется ликвидность предприятия на краткосрочную перспективу и его прибыль. Данным факторам необходимо уделять пристальное внимание в процессе оперативного финансового планирования на любом российском машиностроительном предприятии.

Библиографический список

1. Андрейчиков, А. В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике // А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчиков. М.: Финансы и статистика, 2000. 368 с.
2. Ван Хорн, Дж. К. Основы управления финансами: пер. с англ. / Дж. К. ван Хорн. М.: Финансы и статистика, 2001. 800 с.
3. Ли, Ч. Ф. Финансы корпораций: теория, методы и практика: пер. с англ. / Ч. Ф. Ли, Д. И. Финнерти. М.: Инфра-М, 2000. 686 с.
4. Шим, Д. Основы коммерческого бюджетирования: пер. с англ. / Д. Шим, Д. Сигел. СПб.: Пергамент, 1998. 496 с.

D. V. Eremeev

PECULIARITIES OF FINANCIAL PLANNING OF OPERATIVE ACTIVITIES IN INDUSTRIAL ENTERPRISES

In this article are presented the main positions which are necessary for useful operation financial planning in enterprises. Factor analysis is made in the base of the expert method and the main factories are selected.

Ю. В. Ерыгин, О. С. Голощапова

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ НАЛОГОВОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Предложены принципы и методы налогового стимулирования инновационной деятельности машиностроительных предприятий.

Научно-технический прогресс во всем мире признается ведущим фактором как развития экономики в целом, так и экономического развития хозяйствующего субъекта. В настоящее время одной из труднейших и актуальнейших проблем в России выступает проблема по преодолению кризиса в инновационной и инвестиционной сферах. Последние десять лет наблюдается стремительное снижение валового объема инвестиций в основной капитал: ежегодно они сокращаются в среднем более чем на 13 %. Объем инвестиций в 2003 г. составил 1/3 часть от дореформенного уровня, а норма инвестирования в основной капитал в 2003 г. составляет 16,4 %, что на 2,3 процентных пункта ниже уровня 1995 г.

Высокие масштабы недоинвестирования привели к образованию в производстве колоссальной массы обесцененных кризисом, физически и морально изношенных основных фондов. К настоящему времени средний возраст машин и оборудования превысил 21 год; подавляющая часть основных фондов российской промышленности морально устарела и уже давно эксплуатируется за пределами экономически целесообразного периода. Степень износа основных фондов в промышленности в 2003 г. составила 52,9 %. Инвестиционный процесс ориентирован на краткосрочные периоды обновления производственного аппарата. Лишь незначительная доля инвестиций приходится на машины и оборудование (табл. 1), что свидетельствует о технологическом отставании в промышленности.

Сегодняшний отечественный инвестиционный потенциал не обеспечивает комплексную поддержку выхода основных производств на уровень мировых лидеров. Промышленность остается энергоемкой и ресурсоемкой. Такая ситуация генерирует чрезмерно высокие инвестиционные риски в обрабатывающих отраслях, что естественным образом снижает инвестиционную привлекательность этого сектора экономики, а значит тормозит масштабный инновационный процесс.

Одним из путей выхода российской экономики на стадию устойчивого подъема является развитие инвестици-

онной и инновационной деятельности в машиностроительной отрасли. Машиностроение является базовой отраслью, от уровня развития которой существенным образом зависит эффективность структурных преобразований в экономике страны. Продукция машиностроения – фундамент экономического развития, на котором возможно повышение конкурентоспособности всех остальных секторов и отраслей промышленности. Без активизации инвестиционной и инновационной деятельности в ближайшей перспективе нельзя повысить эффективность производства. Сохранение научного и производственного потенциала машиностроительной отрасли в условиях ограниченности инвестиционных ресурсов требует повышенного внимания со стороны государства. К основным инструментам государственного стимулирования инвестиционной и инновационной деятельности относятся следующие: предоставление финансовой помощи в виде дотаций, субсидий, субвенций, бюджетных ссуд на развитие отдельных территорий, отраслей, производств; проведение финансовой и кредитной политики, политики ценообразования (в том числе выпуск в обращение ценных бумаг), амортизационной политики; введение системы налогов с дифференцированием налоговых ставок и льгот; антимонопольные меры; иные инструменты стимулирования, не противоречащие законодательным и нормативно-правовым актам Российской Федерации.

Приоритетным направлением государственного регулирования инвестиционной и инновационной деятельности является налоговое стимулирование. Наличие налоговых льгот имеет кумулятивный эффект, так как оказывает влияние не только на участников инновационного процесса, но и на государство в целом, гарантируя ему получение стабильных налоговых доходов в будущем и повышение конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке. Для экономической ситуации, сложившейся в Российской Федерации в течение последних лет, характерны трудности, связанные с льготным режимом налогообложения. В послании Президента на 2004 г. было подчеркнуто, что налоговая система у

Таблица 1

Направления инвестиций в основной капитал

Показатели	Новое строительство, %		Модернизация и реконструкция, %	
	Год, %			
	2001	2002	2001	2002
Инвестиции в основной капитал	100,00	100,00	100,00	100,00
В том числе:				
Здания и сооружения	69,3	72,6	38,9	40,6
Машины и оборудование	24,7	19,9	53,8	51,9
Транспортные средства	1,6	1,5	5,3	6,0
Прочие	4,4	6,0	2,0	1,5

нас по-прежнему избыточно ориентирована на фискальную функцию в ущерб другим, прежде всего функции стимулирования роста конкурентоспособности.

Применяемые в современной российской налоговой системе налоговые льготы следует не отменять, а глубоко реформировать, систематизировать, упорядочить, рассчитывать их экономический эффект. Эффективное использование данного инструмента требует детального изучения особенностей реализации инновационного процесса на предприятии машиностроительной отрасли. В связи с этим авторами были изучены основные факторы, оказывающие влияние на эффективность налогового стимулирования инновационной деятельности машиностроительных предприятий (табл. 2). Изучение выявленных факторов позволило сделать вывод о необходимости систематизации факторов по отношению к фазам жизненного цикла продукта, стадиям инновационного процесса, а также видам налогов, имеющим разный характер в зависимости от объемов производства (условно-постоянные и условно-переменные налоги).

Выделенные в табл. 2 факторы на разных стадиях инновационного процесса и фазах жизненного цикла продукта имеют различное влияние на размер налоговых обязательств машиностроительного предприятия. Это объясняется тем, что инновационный процесс на предприятии может иметь различное количество стадий и продукт может находиться на одной из фаз жизненного цикла. На каждой стадии инновационного процесса и фазе жизненного цикла продукта возникающая идея, конструктивное или технологическое решение, образец воздействуют на формирование налогооблагаемой базы хозяйствующего субъекта и определяют уровень коммерческого и финансового риска.

Группа факторов, связанных с материальными и прочими расходами, в большей степени оказывает влияние на условно-переменные налоги из-за значительных затрат на приобретение сырья, материалов, комплектующих изделий. При этом для налога на добавленную стоимость важно своевременное и грамотное осуществление налоговых вычетов. Рост незавершенного производства в машиностроительной отрасли позволяет выделить фактор, связанный с незавершенным производством, и оценить его влияние на формирование налогооблагаемой базы по налогу на прибыль. Рассчитанная на конец месяца сумма незавершенного производства уменьшает сумму прямых расходов текущего месяца, а в следующем месяце данная сумма подлежит включению в состав материальных расходов. Таким образом, незавершенное производство увеличивает налогооблагаемую базу по налогу на прибыль в текущем периоде. Комплексное управление материальными ресурсами предприятия осуществляется в учетной политике на основе выбора способа оценки материальных ресурсов и определения фактической себестоимости в производстве.

Следующей группой факторов, учитывающих специфику инновационной деятельности машиностроительных предприятий, являются факторы, связанные с имуществом и имущественными правами. От количества основных средств, их стоимости, технического уров-

ня, эффективности использования во многом зависит результат инновационной деятельности предприятия. Инновационная деятельность машиностроительных предприятий связана с высокими расходами на приобретение основных средств. В стоимость основных средств, которые покупает фирма, обычно входит НДС. Налоговый кодекс РФ (ст. 171) позволяет принять этот входной налог к вычету, т. е. уменьшить на него сумму НДС, начисленного по реализованным товарам. Как правило, прежде чем начать использовать основное средство, его нужно еще смонтировать и наладить. Пока ведутся эти работы, объект числится на счете 08 «Вложения во внеоборотные активы», а следовательно, принять к вычету входной НДС не представляется возможным. Чтобы возместить входной НДС, уплаченный при покупке основного средства, необходимо принять его к учету. Стоимость объектов мобилизационного назначения и законсервированных или не используемых в производстве мобилизационных мощностей, а также имущество, отнесенное к объектам особого назначения, начиная с 2005 г., будет увеличивать налогооблагаемую базу по налогу на имущество. Таким образом, факторы, связанные с имуществом и имущественными правами, являются условно-постоянными, так как воздействуют на формирование налога на имущество и в постоянной части налога на добавленную стоимость.

Следует также отметить, что выделенные факторы, связанные с прочими расходами, зависят от величины лимитированных объемов, что соответственно влияет на результат инновационной деятельности.

Систематизация и анализ факторов, влияющих на эффективность налогового стимулирования инновационной деятельности машиностроительных предприятий, позволяет провести идентификацию налоговых льгот по фазам жизненного цикла продукта и стадиям инновационного процесса (табл. 3).

Проведенный анализ показал, что факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование налоговых обязательств по условно-постоянным налогам, самое важное значение приобретают на стадиях фундаментальных исследований, научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, а также на стадии опытного производства в фазах внедрения, ускоренного роста и спада. Факторы, влияющие на формирование налогооблагаемых баз по условно-переменным налогам, наиболее значимы при трансформации условно-переменных налогов в условно-постоянные для последующих стадий инновационного процесса. Для стадии промышленного производства в фазах ускоренного роста и упадка стимулирующий эффект имеют льготы, оказывающие влияние на условно-переменные налоги для инноваций со значительными инвестициями. В фазах замедленного роста и насыщения факторы, влияющие на условно-переменные и условно-постоянные налоги, не являются значимыми, поэтому предоставление льгот в этих фазах жизненного цикла продукта не носит стимулирующего характера и будет являться дотационным.

Систематизация факторов позволяет сформулировать базовые принципы налогового стимулирования, заключающиеся в следующем:

**Факторы, оказывающие влияние на эффективность налогового стимулирования
инновационной деятельности машиностроительных предприятий**

Факторы	Фаза жизненного цикла продукта								
	Внедрение				Уско- ренный рост	Замед- ленный рост	Насы- щение	Упадок	
	Стадии инновационного процесса								
	ФИ	НИР	ОКР	ОП			ПП	ПП	ПП
пр				ст	ос				
<i>Факторы, связанные с расходами по производству и реализации продукции</i>									
Значительные расходы на приобретение сырья и материалов	–	–	–	НДС ^v НП ^v	–	НДС ^v НП ^v	НДС ^v НП ^v	–	–
Высокая стоимость покупных и комплектующих изделий	–	–	–	НДС ^v НП ^v	–	НДС ^v НП ^v	НДС ^v НП ^v	–	–
Достаточно высокие расходы на транспортировку ценностей, связанных с их приобретением	–	–	–	НДС ^v НП ^v	–	НДС ^v НП ^v	НДС ^v НП ^v	–	–
Рост незавершенного производства на конец текущего периода	–	–	–	НДС ^v НП ^v	–	НДС ^v НП ^v	НДС ^v НП ^v	–	–
Фиксированный метод оценки сырья и материалов на налоговый период	–	–	–	НДС ^v НП ^v	–	НДС ^v НП ^v	НДС ^v НП ^v	–	–
<i>Факторы, связанные с имуществом и имущественными правами</i>									
Значительные расходы на приобретение основных средств	НДС ^c НИ ^c	НДС ^c НИ ^c	НДС ^c НИ ^c	–	НДС ^c НИ ^c	–	–	–	НДС ^c НИ ^c
Количество основных средств, не принятых к учету	НДС ^c НИ ^c	НДС ^c НИ ^c	НДС ^c НИ ^c	–	НДС ^c НИ ^c	–	–	–	НДС ^c НИ ^c
Величина остаточной стоимости основных средств	НДС ^c НИ ^c	НДС ^c НИ ^c	НДС ^c НИ ^c	–	НИ ^c	–	–	–	НИ ^c
Высокая стоимость ремонта основных средств	НИ ^c	–	–	–	НИ ^c				
Линейный метод амортизации	НИ ^c	НП ^v	НП ^v	НП ^v	НИ ^c				
Низкая стоимость нематериальных активов	–	–	–	НП ^v	–	НП ^v	НП ^v	НП ^v	–
Высокий удельный вес законсервированных производственных мощностей и объектов	НИ ^c	–	–	–	НИ ^c				
<i>Факторы, связанные с прочими расходами</i>									
Значительные расходы, связанные с приобретением права на использование программ для ЭВМ и баз данных по договорам с правообладателем (лицензионным договорам)	НДС ^c	НДС ^c	НДС ^c	–	НДС ^c	НП ^v	НП ^v	НП ^v	НДС ^c
Высокая стоимость услуг факсимильной и спутниковой связи, вычислительных центров, информационных систем	НДС ^c	НДС ^c	НДС ^c	–	НДС ^c	НП ^v	НП ^v	НП ^v	НДС ^c
Значительные расходы на исследование конъюнктуры рынка и отбора необходимого сегмента для конверсионного производства	НДС ^c	НДС ^c	НДС ^c	–	НДС ^c	НП ^v	НП ^v	НП ^v	НДС ^c

Примечание. Принятые сокращения: ФИ – фундаментальные исследования; НИР – научно-исследовательские работы; ОКР – опытно-конструкторские работы; ОП – опытное производство; ПП – промышленное производство; НДС – налог на добавленную стоимость; НИ – налог на имущество; НП – налог на прибыль; индексы: ^c – условно-постоянные налоги; ^v – условно-переменные налоги.

– в фазе внедрения, ускоренного роста и спада жизненного цикла продукта налоговые льготы должны быть установлены по условно-постоянным налогам;

– в фазе замедленного роста и насыщения жизненного цикла продукта налоговые льготы не имеют стимулирующего эффекта и носят дотационный харак-

тер в случае значимых социально-экономических проектов;

- на стадии фундаментальных исследований, научно-исследовательских работ, опытно-конструкторских работ, опытного производства формы налогового стимулирования должны быть установлены по наиболее значимым условно-постоянным налогам, исходя из структуры затрат отрасли;

- на стадии фундаментальных исследований, научно-исследовательских работ, опытно-конструкторских работ, опытного производства формы налогового стимулирования могут быть установлены по условно-переменным налогам, из-за их преобразования в условно-постоянные налоги для последующих стадий инновационного процесса;

- на стадии промышленного производства в фазах устойчивого роста и упадка налоговые льготы должны быть связаны с условно-переменными налогами для инновационных проектов со значительными капиталовложениями;

- налоговые льготы должны быть предоставлены для всех предприятий-конкурентов, таким образом льготы направляются на повышение конкурентоспособности по импортозамещающим товарам;

- льготное налогообложение должно учитывать сбалансированность интересов налогоплательщика и казны государства.

Предложенная система принципов положена в основу разработанной авторами методики определения вида, форм и размера налоговых льгот. Выбор форм налогового стимулирования инновационной деятельности машиностроительных предприятий по условно-переменным налогам требует количественной оценки размера предоставленных льгот. Поэтому следующим этапом исследования является разработка методики определения размера налогового стимулирования по условно-переменным налогам для следующих форм: уменьшение налога, налоговый вычет, корректировка налоговой ставки, инвестиционный налоговый кредит.

В основу данной методики положены методы оптимизации, что позволяет экономически наиболее полно, точно, достоверно обосновать решение о размере налогового стимулирования, используя альтернативное вариантное построение, при котором принятие одного из вариантов полностью исключает принятие остальных. Для количественного определения размера налоговых льгот применяется подход, основанный на оптимизации структуры капитала по критерию его максимальной рентабель-

ности. Для определения размера налогового стимулирования инновационной деятельности машиностроительных предприятий по условно-переменным налогам применительно к формам налогового стимулирования используется укрупненный алгоритм (см. рисунок).

В соответствии с предлагаемым алгоритмом, определение размера налоговых льгот по условно-переменным налогам для таких форм, как уменьшение налога, налоговый вычет, корректировка налоговой ставки, инвестиционный налоговый кредит, проводится в три этапа.

На первом этапе определяется оптимальная структура капитала по критерию максимальной рентабельности собственного капитала. Структура капитала, используемого предприятием, во многом определяет многие аспекты не только финансовой, но и операционной и инвестиционной (инновационной) деятельности, оказывает активное воздействие на конечные результаты этой деятельности.

Являясь главной экономической базой инновационного развития предприятия, капитал в процессе своего функционирования обеспечивает интересы государства и хозяйствующих субъектов. Капитал является главным источником формирования благосостояния. Он обеспечивает необходимый уровень этого благосостояния как в текущем, так и в перспективном периоде. Высокоэффективное использование капитала в процессе его хозяйственной деятельности обеспечивается путем максимизации показателя рентабельности собственного капитала при приемлемом для предприятия уровне финансового риска.

Для определения оптимального соотношения между собственными и заемными финансовыми ресурсами используется механизм финансового левиреджа. Расчет эффекта финансового рычага позволяет заблаговременно принять решение о воздействии на динамику источников финансирования в нужном направлении для недопущения роста риска инвестиций и инноваций. Проведение многовариантных расчетов с использованием механизма финансового левиреджа позволяет определить оптимальную структуру капитала, обеспечивающую максимизацию уровня финансовой рентабельности.

Увеличение объема генерирования финансовых ресурсов может быть достигнуто за счет осуществления эффективного налогового стимулирования инновационной деятельности. Государство выступает как главный инвестор, призванный содействовать инновационному развитию. Государство, стимулируя инновационный процесс с помо-

Таблица 3

Идентификация налоговых льгот

Налоги	Фаза жизненного цикла продукта									
	Внедрение			Ускоренный рост	Замедленный рост	Насыщение	Упадок			
	Стадии инновационного процесса									
	ФИ	НИР	ОКР	ОП			ПП	ПП	ПП	
пр.				ст.	ос.					
Условно-постоянные налоги	X	X	X	X			X	O	O	X
Условно-переменные налоги	!	!	!	!			*	O	O	*

Примечание. Принятые обозначения: X – предоставление льгот имеет стимулирующий эффект; O – предоставление льгот не имеет стимулирующего эффекта и устанавливаются не из экономического характера; ! – предоставление льгот имеет стимулирующий эффект при выполнении работ сторонними организациями; * – предоставление льгот имеет стимулирующий эффект при инновациях со значительными инвестициями.

щью налоговых льгот, получает долгосрочные гарантии возврата вложенного в экономику России. Размер максимальной величины налоговых льгот по условно-переменным налогам определяется, исходя из расчета сумм налоговых обязательств по максимальным налоговым ставкам.

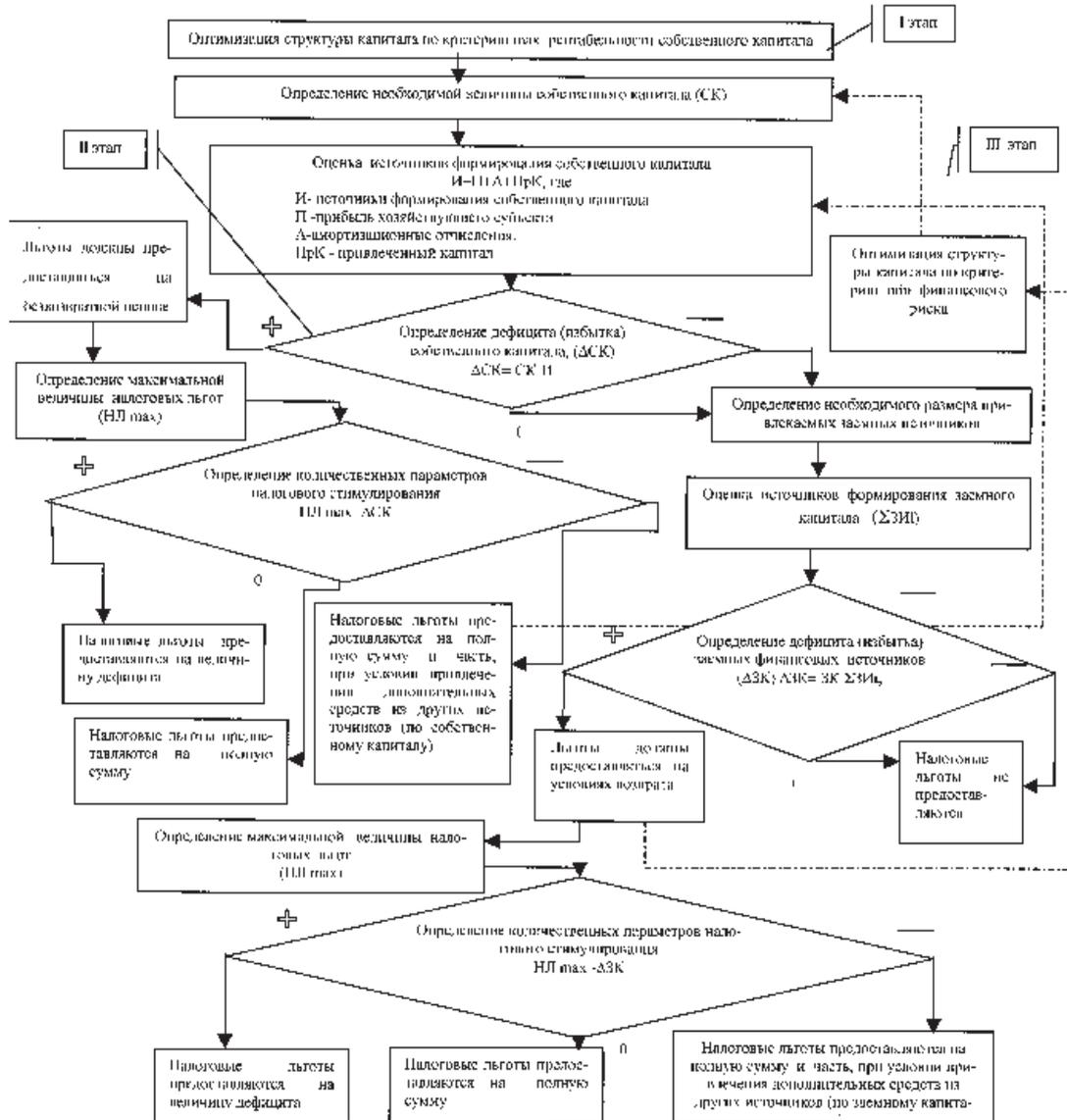
В связи с этим для дальнейшего исследования было проанализировано влияние налогового корректора на структуру капитала. Анализ чувствительности выявил отсутствие обратной связи между изменением налогового корректора и структурой капитала и показал, что больший прирост коэффициента рентабельности собственного капитала можно получить благодаря снижению ставки налогообложения прибыли, повысив тем самым его воздействие. Это обстоятельство приводит к реализации второго этапа алгоритма.

На втором этапе определяется необходимая величина собственного капитала и размер невозвратных налоговых льгот применительно к формам налогового стимулирования инновационной деятельности машиностроительных предприятий. Поэтому, исходя из критерия максимизации рентабельности собственного капитала, оп-

ределяется величина собственного капитала, которая обеспечивает необходимый уровень самофинансирования инновационного развития. Для этого проводится анализ внутренних и внешних источников формирования собственных финансовых ресурсов.

В составе внутренних источников формирования собственных финансовых ресурсов основное место принадлежит прибыли, остающейся в распоряжении предприятия. Она характеризует часть прибыли предприятия, полученную в предшествующем периоде и не использованную на потребление. Прибыль является относительно дешевым источником финансирования, но она ограничена в размерах. Определенную роль в составе внутренних источников играют также амортизационные отчисления, особенно на инновационных предприятиях с высокой стоимостью используемых собственных основных средств, однако они не увеличивают сумму собственного капитала предприятия, а лишь являются средством его реинвестирования.

Объем привлечения собственных финансовых ресурсов из внешних источников призван обеспечить ту их часть,



Алгоритм определения количественных параметров налогового стимулирования инновационной деятельности машиностроительных предприятий

которую не удалось сформировать за счет внутренних источников финансирования за счет привлечения дополнительного паевого капитала, дополнительной эмиссии акций. Процесс привлечения собственного капитала за счет внешних источников характеризуется высоким уровнем сложности, что требует разработки высокоэффективной финансовой политики на предприятии, обеспечивающей достаточно эффективное использование этого инструмента. Поэтому к данному источнику формирования собственных финансовых ресурсов следует прибегать лишь в крайне ограниченных случаях. В такой ситуации весьма важной становится роль государства, которое посредством налоговых льгот может обеспечить необходимый размер собственного капитала предприятия.

Привлечение собственного капитала не связано с возвратным денежным потоком по основной его сумме, поэтому существует необходимость привлечения основной суммы на безвозвратной основе с помощью налоговых льгот. Необходимый размер льготного налогообложения на невозвратной основе для таких форм налогового стимулирования, как уменьшение налога, корректировка налоговой ставки, налоговый вычет, определяется в следующих случаях:

– если сумма привлекаемых за счет других источников собственных финансовых ресурсов не обеспечивает общую потребность в собственном капитале и составляет меньший размер, чем предельная величина налоговых льгот, то льготное налогообложение предоставляется на необходимую сумму;

– если сумма привлекаемых за счет других источников собственных финансовых ресурсов не обеспечивает общую потребность в собственном капитале и равна предельной величине налоговых льгот, то льготное налогообложение предоставляется на всю сумму;

– если сумма привлекаемых за счет других источников собственных финансовых ресурсов не обеспечивает общую потребность в собственном капитале и составляет больший размер, чем предельная величина налоговых льгот, то льготное налогообложение предоставляется на необходимую сумму, при условии привлечения средств из других источников собственного капитала.

Если у хозяйствующего субъекта существует потребность в привлечении заемного капитала, то осуществляется переход к третьему этапу. В этом случае проводится оптимизация структуры капитала по критерию минимизации уровня финансовых рисков. Выбор данного критерия оптимизации объясняется тем, что рост заемных источников повышает финансовый риск, так как предполагает обязательность расчетов по долговым обязательствам в сочетании с объективно присущей инновационной деятельности неопределенностью конечных результатов.

Степень финансового риска сокращается в связи с уменьшением стоимости капитала за счет привлечения инвестиционного налогового кредита. При этом следует отметить, что в состав внереализационных расходов, уменьшающих налогооблагаемую базу по налогу на прибыль, относятся проценты от предоставленного инвестиционного налогового кредита. Поэтому на третьем этапе определяется необходимая величина заемного капитала и размер возвратных налоговых льгот применительно к такой форме налогового стимулирования, как инвестиционный налоговый кредит. Государство в данном случае выступает как заемщик, заинтересованный в первую очередь в возврате денежных средств, поэтому оно может обеспечить для хозяйствующего субъекта наименьший уровень финансового риска заемного капитала. Необходимый размер льготного налогообложения на возвратной основе в форме инвестиционного налогового кредита, обеспечивающий минимизацию риска заемного капитала, определяется в следующих случаях:

– если сумма привлекаемых за счет других источников заемных финансовых ресурсов не обеспечивает общую потребность в заемном капитале и составляет меньший размер, чем предельная величина налоговых льгот, то льготное налогообложение предоставляется на необходимую сумму;

– если сумма привлекаемых за счет других источников заемных финансовых ресурсов не обеспечивает общую потребность в заемном капитале и равна предельной величине налоговых льгот, то льготное налогообложение предоставляется на всю сумму;

– если сумма привлекаемых за счет других источников собственных финансовых ресурсов не обеспечивает общую потребность в заемном капитале и составляет большую потребность, чем предельная величина налоговых льгот, то льготное налогообложение предоставляется на необходимую сумму, при условии привлечения средств из других источников заемного капитала.

Предложенная методика определения размера налогового стимулирования инновационной деятельности машиностроительных предприятий позволяет создать реальные условия для активизации инновационной деятельности машиностроительной отрасли.

Библиографический список

1. Налоговый кодекс РФ: в 2 ч. М.: ООО «ТК Велби», 2004. 512 с.
2. Завлин, П. Н. Инновационный менеджмент / П. Н. Завлин, А. К. Казанцев, Л. Э. Миндели; ЦИСН. М., 1998. 568 с.

U. W. Erygin, O. S. Goloschapowa

PRINCIPLES AND METHODS OF TAX STIMULATION OF INNOVATIVE ACTIVITIES OF CAR MANUFACTURING FACTORIES

The following tax stimulation principles and methods of car manufacturing factories innovative activities are offered here.

Г. Г. Крушенко, М. А. Мартус

УПРАВЛЕНИЕ СТОИМОСТЬЮ КОМПАНИИ КАК ИНСТРУМЕНТ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ И ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТЬЮ

Рассматривается сущность концепции управления стоимостью компании, анализируются методы измерения стоимости, определения формирующих ее факторов и критериев принятия верных решений в бизнесе. Определен порядок действий, необходимых для успешной организации в компании процесса управления, нацеленного на создание стоимости.

Инвесторы вкладывают деньги не в активы, а в свои будущие доходы. Им важно, как увеличивается цена бизнеса, т. е. стоимость приходящейся им доли в конкретном предприятии [1]. Вложение средств в компанию окажется максимально выгодным лишь в том случае, если менеджеры будут объективно оценивать стоимость вверенного им бизнеса и делать все, чтобы она непрерывно росла. Эта задача решается с помощью новой концепции менеджмента – Управления стоимостью компании» (УСК) (Value based management, VBM).

Оценка как процесс определения стоимости прав собственности на тот или иной объект известна давно, но до недавнего времени она рассматривалась в отрыве от целей и задач стратегического управления и финансового менеджмента. В настоящее время концепция стоимости принята экономическим сообществом в качестве базовой парадигмы развития бизнеса [2].

Стоимость (ее прирост) – это экономический критерий, отражающий интегральный эффект влияния принимаемых решений на все параметры, по которым оценивается деятельность предприятия (доля рынка и прочность конкурентной позиции, доходы, инвестиционные потребности, операционная эффективность, налоговое бремя, регулирование и, в конечном итоге, потоки денежных средств и уровень риска), позволяющий ранжировать варианты в ситуации множественного выбора. Только при наличии такого критерия обеспечивается согласованность, направленность (а в конечном итоге – сбалансированность и эффективность) повседневных усилий на всех уровнях управления. Несмотря на то что измерение стоимости компании является неотъемлемой составной частью VBM-подхода, он принципиально отличается от традиционных методов оценки бизнеса.

Концепция Управления стоимостью компаний появилась в середине 1980-х гг. в США. На этом этапе к исторической проекции традиционного анализа финансовых показателей добавляется направленная в будущее ось долгосрочного прогноза, когда оценка финансовых последствий важнейших управленческих решений строится с учетом вероятной динамики изменений внешней и внутренней среды организации. VBM-подход относится к продвинутому (Advanced) финансовому менеджменту.

В 1990-х гг. этот метод пришел в Европу и Азию, а несколько лет назад новую философию управления стали использовать и крупные российские компании, которые хотели соответствовать требованиям западного инвестора («Вимм-Билль-Данн Продукты питания», стра-

ховая компания РОСНО, использование УСК планируют ЮКОС и ЛУКОЙЛ) [3].

Большой вклад в популяризацию стоимостного подхода к управлению внесли сотрудники консалтинговой компании McKinsey. Книга партнеров компании Тома Коупленда (Tom Copeland), Тима Коллера (Tim Koller) и Джека Муррина (Jack Murrin) «Стоимость компаний: оценка и управление» («Valuation: Measuring and Managing The Value of Companies») [4] стала бестселлером деловой литературы. Также можно говорить о формировании ряда школ, представленных разными консалтинговыми компаниями («Stern Stewart & Co», «Marakon Associates», «McKinsey & Co», «Price Waterhouse Coopers», «L.E.K. Consulting», «HOLT Value Associates» и др.) [3], пропагандирующими свои собственные системы управления стоимостью. Беннетам Стюартам (G. Bennett Stewart). В 1990 г. в издательстве «Harper Business» была опубликована книга «The quest for value: a guide for senior managers».

Стремление участников рынка дифференцировать свое предложение привело к тому, что наряду с классической моделью дисконтированного денежного потока сегодня существует достаточно широкий спектр новаторских продуктов, построенных на основе специально сконструированного экономического показателя, изменение которого и служит мерой успеха. EP, SVA, EVA® (торговая марка компании «Stern Stewart & Co»), REVA, CVA, CFROI, MVA, TSR, TBR – таков неполный перечень популярных акронимов.

Процесс управления рыночной стоимостью компании в качестве базы использует доходный подход к оценке компании (бизнеса). Концептуальной базой даже самой изощренной конструкции управления стоимостью остается базовый принцип корпоративных финансов: *стоимость компании определяется денежными потоками, которые она сможет генерировать в будущем, дисконтированными по ставке доходности, учитывающей совокупные риски активов компании и риски финансирования* [5]. Показатель чистой прибыли не коррелирует с рыночной стоимостью предприятия также устойчиво, как показатель денежного потока, поскольку первый не учитывает размеры инвестиций в основные средства; величину собственных оборотных средств; потребности предприятия в финансировании; уровень рисков, характерный для данного предприятия [6].

Стержнем идеологии стоимостного подхода является выбор задачи максимизации стоимости компании за счет

непрерывного роста экономической добавленной стоимости в качестве генеральной корпоративной цели и твердая убежденность, по крайней мере, верхнего эшелона управленцев в возможности целенаправленного и систематического управления процессом ее создания. Все другие цели: удовлетворенность потребителя, доля рынка, мировая известность – являются промежуточными. Они, как правило, отражают степень влияния различных групп, претендующих на долю в результатах деятельности компании, и либо трансформируются в задачу максимизации стоимости, либо служат ограничениями на пути решения этой задачи.

Основные постулаты стоимостного подхода к управлению заключаются в следующем:

– в каждый момент времени у компании и каждого ее элемента объективно и реально существует так называемая истинная стоимость (intrinsic value);

– эта истинная стоимость равна сумме всех чистых (свободных) денежных потоков, которые будут созданы этим элементом за все время его существования, дисконтированных по реальной дисконтной ставке, отражающей реально существующие риски отклонения истинных денежных потоков от ожидаемых (концепция предопределенности будущего);

– в силу объективного и неустранимого несовершенства способностей и инструментов аналитиков и менеджеров как чистые денежные потоки, так и дисконтная ставка могут быть оценены лишь приблизительно, с некоторой предельно возможной точностью;

– практика показала, что этой точности вполне достаточно как для осуществления инвестиционных сделок (покупки и продажи бизнеса, привлечения инвестиций, публичного предложения акций и т. д.), так и для повседневного управления бизнесом и отдельными его элементами (в частности, функцией маркетинга).

Концепция стоимости советует отказаться от неэффективных бухгалтерских критериев успешности функционирования компании и принимать во внимание только один критерий, наиболее простой и понятный для акционеров и инвесторов – вновь добавленную стоимость.

Система показателей, характеризующих деятельность компании в рамках концепции управления стоимостью, постоянно обновляется. По мере внедрения современ-

ных информационных технологий, появления новых идей, показатели становятся все более объективными и сложными (рис. 1) [7].

В зависимости от значимости финансовых показателей в нем выделяются две группы методов. В 80–90-х гг. появился целый ряд показателей (на основе некоторых из них в дальнейшем возникли даже системы управления: например EVA и EVA-based management), отражающих процесс создания стоимости. Наиболее известные из них – EVA, MVA, SVA, CVA и CFROI и др., для которых характерен финансовый уклон. Однако, как отмечается в некоторых работах [1; 3; 4; 7], рекомендации аналитиков примерно на 30 % исходят из нефинансовых критериев, при этом принимается во внимание качество менеджмента, его способность реализовывать выбранную стратегию.

Указанные особенности, наряду с финансовыми показателями, в большей степени позволяет учесть приближенный к управленческому мышлению метод сбалансированной системы показателей BSC (Balanced Scorecard) (рис. 2).

По своей сути первая группа VBM-методов базируется на объединении традиционных моделей Дюпона и дисконтированного денежного потока DCF. Эти методы различаются главным образом вариантами расчета затрат капитала, получением результата в абсолютных или процентных величинах. От системы Дюпона взята идея представления результирующего финансового показателя, например доходности совокупных активов ROA, в виде многоярусного дерева взаимосвязанных параметров, подлежащих управлению и контролю показателей, которые определяют поток денежных средств. Некоторым исключением из сказанного выступает модель оценки на основе опционов.

Модель DCF вносит в VBM фактор будущих, а не прошлых денежных поступлений предприятия, а также позволяет учесть связанные с неопределенностью деятельности риски [7].

Рассмотрим более подробно способы расчета, преимущества и недостатки основных показателей оценки эффективности управления, используемые в рамках концепции УСК.

Market Value Added (MVA). MVA рассматривает в качестве критерия создания стоимости рыночную капитализацию и рыночную стоимость долгов компании:

Изменение подходов к оценке управления на основе стоимости:



Рис. 1. Эволюция финансовых показателей в оценке эффективности управления

$$MVA = \text{Рыночная стоимость долга} + \\ + \text{рыночная капитализация} - \text{совокупный капитал.}$$

Следует учитывать, что в балансовую оценку совокупного капитала должны быть внесены поправки для устранения искажений, вызванных методами учета и некоторыми учетными принципами. С точки зрения теории корпоративных финансов, MVA отражает дисконтированную стоимость всех настоящих и будущих инвестиций.

Одной из основных целей системы VBM является координация и мотивация принятия решений, ведущих к созданию долгосрочных конкурентных преимуществ. Показатель MVA не отвечает данным требованиям, так как на рыночную капитализацию оказывают влияние многие факторы, часть из которых неподконтрольна менеджменту компании. Более того, если результаты работы компании будут оцениваться по данному показателю и мотивационные схемы также будут привязаны к нему, то это может привести к тому, что руководство будет принимать решения, оказывающие краткосрочное влияние на курсовую стоимость акций, но разрушающие стоимость в долгосрочной перспективе. В ответ на данные недостатки возник целый ряд альтернативных показателей стоимости.

Economic Value Added (EVA). Концепция EVA базируется на комплексном подходе к трем основным сферам менеджмента:

- составлению капитального бюджета;
- оценке эффективности деятельности подразделений или компании в целом;
- разработке оптимальной справедливой системы премирования менеджмента.

Преимущества применения концепции в первых двух сферах связаны с адекватным и нетрудоемким определением степени достижения подразделением, фирмой или отдельным проектом цели по увеличению рыночной стоимости, а также с наличием исходных данных для проведения такого расчета в российских компаниях.

Показатель EVA является самым известным и распространенным из всех существующих показателей, предназначенных для оценки процесса создания стоимости компании. Причина этого состоит в том, что данный показатель сочетает простоту расчета и возможность определения стоимости компании, а также позволяет оценивать эффективность как предприятия в целом, так и отдельных подразделений. EVA является индикатором качества управленческих решений: постоянная положительная величина этого показателя свидетельствует об увеличении стоимости компании, тогда как отрицательная – о ее снижении. Раз-

работчиком концепции является Стерн Стюарт, активным внедрением и реализацией концепции занимается компания «Stern Stewart & Co».

Целью управления стоимостью компании на основе показателя EVA является создание такой стоимости компании для инвестора, когда операционная прибыль превышает средневзвешенную стоимость использованного капитала в денежном выражении. Другими словами, добавленная стоимость возникает в том случае, если рентабельность активов компании превышает средневзвешенные затраты на капитал.

Показатель EVA определяется как разница между чистой операционной прибылью после налогообложения и затратами на капитал за тот же период:

$$EVA = EBIT (1-T) - K_w \cdot C,$$

где EBIT – величина доходов до уплаты налогов и процентов; T – ставка налога на прибыль (в долях единицы); K_w – средневзвешенная цена капитала (WACC); C – стоимостная оценка капитала.

В принципе, EVA идентична категории остаточного дохода (Residual Income, RI), предложенной Альфредом Маршаллом. Важным отличием является то, что EVA устраняет существующие в традиционной бухгалтерской отчетности искажения путем внесения более 150 поправок. Указанные поправки в основном вносятся для нивелирования общей направленности традиционной бухгалтерской отчетности на интересы кредитора.

Исходя из приведенной выше формулы расчета показателя EVA, можно сделать выводы о возможных путях улучшения значения данного показателя:

- увеличение доходов, генерируемых вложенными средствами;
- расширение, т. е. инвестирование средств в проекты;
- повышение эффективности управления активами;
- управление структурой капитала.

Рыночная стоимость, выраженная в показателе MVA, является, по сути, дисконтированной суммой всех будущих EVA. Стоимость компании можно записать следующим образом:

$$\text{Стоимость компании} = \text{инвестированный капитал} + \\ + \text{дисконтированная EVA от существующих проектов} + \\ + \text{дисконтированная EVA от будущих инвестиций.}$$

Таким образом, увеличение EVA за какой-либо период не всегда свидетельствует о том, что стоимость фирмы также возрастает. По приведенной выше зависимости следует, что увеличение EVA за рассматриваемый пе-



Рис. 2. Классификация методов VBM

риод может привести к снижению стоимости компании. Это может произойти по нескольким причинам:

- увеличение EVA в рассматриваемом периоде может быть связано с возрастанием риска;
- рост данного показателя в каком-либо периоде может быть вызван факторами, имеющими негативные последствия в долгосрочной перспективе.

Таким образом, подход к построению системы VBM на основе показателя EVA не полностью устраняет недостатки и ограничения, обсуждаемые при рассмотрении показателя MVA. С этой точки зрения более привлекательными выглядят показатели, учитывающие будущие денежные потоки.

Shareholder Value Added (SVA). В работах Альфреда Раппапорта SVA определяется как приращение между двумя показателями – стоимостью акционерного после некоторой операции и стоимостью того же капитала до этой операции.

Часто дается несколько иная трактовка: SVA – это приращение между расчетной стоимостью акционерного капитала (например, методом дисконтированных денежных потоков) и балансовой стоимостью акционерного (собственного) капитала.

Несмотря на существенные различия этих двух подходов, между ними есть общее: для определения SVA необходимо определить рыночную стоимость акционерного капитала. Для этого используются широко известные методы оценки стоимости компании путем дисконтирования денежных потоков.

$$SVA = \text{расчетная стоимость акционерного капитала} - \text{балансовая стоимость акционерного капитала.}$$

Основным недостатком данной модели является трудоемкость расчетов и сложности, связанные с прогнозированием денежных потоков.

Cash Flow Return on Investment (CFROI). Одним из недостатков показателя EVA, рассмотренного выше, является игнорирование денежных потоков. Данный недостаток устраняется при расчете показателя CFROI:

$$CFROI = \frac{\text{скорректированные денежные притоки (cash in) в текущих ценах}}{\text{скорректированные денежные оттоки (cash out) в текущих ценах.}}$$

Другим преимуществом данного показателя, по сравнению с EVA, является тот факт, что как денежные потоки, генерируемые существующими и будущими активами, так и первоначальные инвестиции выражаются в текущих ценах, т. е. учитывается фактор инфляции.

Если показатель CFROI превышает требуемый инвесторами средний уровень, то компания создает стоимость, и наоборот, если CFROI ниже требуемой доходности, то стоимость компании будет понижаться.

Одним из главных недостатков данной модели является то, что результат выражается не в сумме созданной (или разрушенной) стоимости, а в виде относительного показателя. Данный факт может служить препятствием при внедрении на предприятии системы VBM, так как для некоторых нефинансовых менеджеров интерпретация данного показателя может не быть столь же ясной, как, например, EVA. Другим недостатком данного подхода является сложность расчета показателя CFROI, поскольку

для этого необходимо идентифицировать все денежные потоки, генерируемые как существующими, так и будущими активами.

Cash Value Added (CVA). Часто данный показатель также называют Residual Cash Flow (RCF). В последнее время все большее число специалистов отдают предпочтение именно данному критерию создания стоимости по следующим причинам:

- в качестве отдачи от инвестированного капитала используется потоковый показатель – денежные потоки (cash flows);

- в явном виде, в отличие от показателя CFROI, учитываются затраты на привлечение и обслуживание капитала из разных источников, т. е. средневзвешенная цена капитала.

В основе данного показателя лежит концепция остаточного дохода (residual income), а формула его расчета имеет следующий вид:

$$RCF (CVA) = AOCF - WACC \cdot TA,$$

где AOCF (Adjusted Operating Cash Flows) – скорректированный операционный денежный поток; WACC – средневзвешенная цена капитала; TA – суммарные скорректированные активы. Корректировки, вносимые при расчете указанных величин аналогичны тем, которые производятся при обсуждении EVA.

В силу того что каждый из рассмотренных показателей имеет свои ограничения и недостатки, а также потому, что область стоимостных показателей является относительно новой отраслью знаний, некоторые авторы предлагают комбинированное использование нескольких показателей при оценке процесса создания стоимости. На наш взгляд, такой подход не будет оптимальным, так как эффективность системы VBM может быть достигнута при подчинении всех значимых управленческих решений единой цели, что предполагает наличие единого критерия, на основе которого строится и оценка эффективности, и система мотивации. Поэтому в каждом конкретном случае менеджмент предприятия должен выбрать соответствующий стоимостной показатель, исходя из соображений оперативности, выгод и затрат, связанных с получением информации, необходимой для его расчета. На наш взгляд, EVA является наиболее подходящим показателем, так как он отражает процесс создания стоимости и может быть рассчитан не только для предприятий, акции которых котируются на открытом рынке [8].

Внедрение системы управления стоимостью – процесс продолжительный (2–3 года), ориентированный на долгосрочную перспективу, имеющий стратегическое значение для компании, и он должен пройти несколько этапов (см. таблицу) [9].

Первый этап – оценка стоимости предприятия на текущий момент с созданием модели, учитывающей индивидуальность денежных потоков конкретного предприятия. Это своего рода портрет предварительной готовности компании (здесь преобладает бухгалтерское видение, но с осознанием его ограниченности, поэтому это скорее нулевая ступень). Общий денежный поток можно представить как сумму денежных потоков отдельных подразделений и филиалов, создающих стоимость (так называемые центры прибыли–стоимости), и обслу-

живающих подразделений (сюда относятся и высший аппарат управления), напрямую не создающих стоимость. На основании сформированной финансовой модели предполагается реализация всех управленческих решений – стратегических и оперативных, финансовых и организационных.

В случае необходимости принятия решений о проведении дополнительной эмиссии акций, выборе инвестиционного проекта, реструктуризации предприятия и по другим стратегическим вопросам, расчет эффекта от принятого решения производится также детально и подробно, как и оценка предприятия на первом этапе [9].

Создание новой стоимости предполагает сначала выявление конкретных факторов, определяющих ее изменение, затем разработку на их основе стратегий по увеличению стоимости и далее последовательное целенаправленное воплощение этих стратегий [4]. Что составляет содержание второго этапа внедрения системы управления стоимостью

К важнейшим факторам, движущим стоимость, относятся временной фактор, объемы реализации, себестоимость реализованной продукции, соотношение постоянных и переменных затрат, маржа валовой прибыли; собственные оборотные средства, основные средства, соотношение собственных и заемных средств в структуре капитала предприятия, стоимость привлечения капитала.

Первые семь факторов непосредственно влияют на величину денежного потока, последние два – на ставку дисконта. Воздействие на те или иные факторы (управление стоимостью) осуществляется в соответствии с конкретными стратегиями развития предприятия (бизнеса): операционными, инвестиционными, финансовыми [6].

Показатели детализируются для каждого уровня управления, что приводит к тому, что высшее звено руководства зачастую контролирует финансовые показатели, в то время как низшие звенья менеджмента отвечают за количественные и качественные результаты работы.

На третьем этапе стоимость компании в идеале должна стать основным ориентиром при принятии любых решений, будь то заключение договора с новым поставщиком или решение о продаже одного из подразделений предприятия. Если планируемое действие повлечет за собой снижение стоимости компании, то оно должно быть отвергнуто.

Внедрение концепции УСК в сложившуюся систему управления компанией невозможно без подготовленных кадров, способных как самостоятельно выполнять расчеты, так и доводить оперативную информацию до соответствующих отделов [10].

Процесс проведения реформы, начатый с корпоративного центра, состоящий в пересмотре его целевых

установок и бизнес-портфеля, а также в принятии решения вести управление эффективностью функционирования бизнеса в рамках общей структуры, ставит перед компанией задачу распространить эту систему на все подразделения (бизнес-направления). Принцип максимизации стоимости задает единую проекцию для оценивания результатов, универсальную систему координат для управления как отдельными подсистемами, так и организацией в целом, единую шкалу для измерения успеха на пути реализации стратегии и достижения видения.

Схема факторов стоимости, система оценки управленческих решений и порядок вознаграждения труда способствуют повышению инициативности сотрудников, поскольку четко определяют перед ними цели и дают уверенность в адекватной оценке труда [10]. Среди институциональных изменений, безусловно, нужны и инновации в системе вознаграждения персонала. VBA позволяет построить максимально эффективную и справедливую систему материальной компенсации сотрудников компании, напрямую привязанную к размеру стоимости, созданной каждым сотрудником компании. В конечном счете залог успеха любых управленческих инноваций – это лояльность и мотивированность сотрудников.

Если компания применяет модель экономической добавленной стоимости или EVA®, то результаты центра стоимости измеряются по этой модели. Он получает целевое задание по EVA®, и качество работы менеджеров оценивается на основе достижения именно этой цели. Руководство центра стоимости, в свою очередь, должно разработать целевые задания по ключевым факторам стоимости: темпам роста, рентабельности, инвестициям, определить параметры конкурентоспособности для остальных этажей управления, т. е. для центров прибыли, центров доходов [2].

Для периодического сопоставления достигнутых результатов с целевыми индикаторами следует составить строгий календарный план анализа эффективности. В соответствии с этим графиком несколько раз в год проводятся собрания с участием менеджеров и рядовых работников, на которых оцениваются и обсуждаются результаты предпринимаемых усилий, а также происходит поиск новых путей повышения эффективности. Наилучшей информационной базой контроля результатов деятельности служит оценочная ведомость, в которую входят все стоимостные измерители и ключевые показатели эффективности (КПЭ), выявленные посредством анализа факторов создания стоимости [4].

Информация о результатах деятельности предприятия рассматривается сквозь призму концепции УСК, которая может через определенные промежутки времени представляться заинтересованным лицам. Это не разовая ак-

Этапы внедрения систем управления стоимостью

1 этап	2 этап	3 этап	4 этап	5 этап
Определение точки отсчета – оценка рыночной стоимости компании	Составление схемы факторов стоимости компании	Создание системы оценки оперативных и стратегических управленческих решений	Анализ вклада подразделений в стоимость компании	Периодическая оценка. Подготовка отчетов с позиции управления стоимостью
Внедрение системы оперативного контроля над стоимостью активов				
Подготовка кадров				

ция, а постоянно проводимая работа по увеличению информационной прозрачности предприятия.

Мониторинг бизнес-модели компании включает:

- мониторинг EVA (проверка на соответствие плановых и фактических показателей);
- мониторинг ключевых факторов стоимости компании;
- мониторинг деятельности подразделений;
- мониторинг деятельности менеджеров и других работников компании.

В процессе актуализации бизнес-модели компании проводятся следующие мероприятия:

- внесение изменений в бизнес-модель компании и в набор ключевых факторов, формирующих стоимость компании;
- разработка новых показателей оценки деятельности компании;
- разработка новых показателей оценки деятельности подразделений;
- разработка новых показателей оценки деятельности менеджеров и персонала.

Постановка замкнутого контура управления стоимостью компании позволит принимать обоснованные решения о необходимости изменений в составе активов компании, включая неоперационные (избыточные), социальные и финансовые; целесообразности участия в капитале других компаний; эффективности существующих бизнесов компании и целесообразности открытия новых бизнес-линий; характере динамики стоимости имущества и компании в целом с учетом поставленных стратегических и оперативных целей управления, а также многих других задач [1]. При таком подходе к управлению достигается максимальная стоимость компании и обеспечивается выживаемость и высокая конкурентоспособность компании. По сути, такое управление представляет собой непрерывную реорганизацию, направленную на достижение максимальной стоимости.

От традиционного анализа финансовых результатов за определенный период и их сопоставления с аналогичными показателями в прошлом менеджмент переходит к долгосрочному прогнозу денежных потоков и непрерывному мониторингу опережающих нефинансовых индикаторов.

Таким образом, словосочетание Value Based Management стало сегодня символом применения последних достижений в области управленческих технологий и са-

мых современных инструментов финансового менеджмента, позволяющих эффективно планировать, контролировать и направлять действия организации на пути к достижению экономически оправданных целей.

Библиографический список

1. Еленева, Ю. Стоимостной подход как основа современного управления бизнесом [Электронный ресурс] / Ю. Еленева // Team – технологии корпоративного управления. Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.iteam.ru/articles.php?pid=1&tid=2&sid=20&id=403>, 17.02.2003. Загл с экрана.
2. Зозуля, В. EVA: новый взгляд на старые вещи [Электронный ресурс] / В. Зозуля. Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.management.com.ua/finance/fin008.html>. Загл с экрана.
3. Ибрагимов, Р. Г. Управление по стоимости как система менеджмента / Р. Г. Ибрагимов // Менеджмент в России и за рубежом. 2004. № 6. С. 64–72.
4. Коупленд, Т. Стоимость компаний: оценка и управление / Т. Коупленд, Т. Коллер, Дж. Мурин. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 1999. 578 с.
5. Модильяни, Ф. Сколько стоит фирма? / Ф. Модильяни, М. Миллер. М.: Дело, 1999.
6. Цау, К. Планирование устойчивого развития промышленного предприятия: автореф. дис. ... канд. экон. наук / К. Цау; САА. Красноярск, 2003. С. 11–12.
7. Рассказов, С. В. Стоимостные методы оценки эффективности менеджмента компании [Электронный ресурс] / С. В. Рассказов, А. Н. Рассказова. Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.dis.ru/fm/arhiv/2002/3/7.html>. Загл с экрана.
8. Степанов, Д. Value-Based management и показатели стоимости [Электронный ресурс] / Д. Степанов. Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.dstepanov.spb.ru/publications/vbm02.htm>. Загл с экрана.
9. Баяндин, Э. Оценка и управление стоимостью компании [Электронный ресурс] / Э. Баяндин. Режим доступа: <http://www.riarsi.ru/Articles/009.htm>
10. Ивашковская И. Управляемая стоимость [Электронный ресурс] / И. Ивашковская. Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.manage.ru/press/sf/2003-04/08.shtml>. Загл с экрана.

G. G. Krushenko, M. A. Martus

VALUE BASED MANAGEMENT AS A TOOL OF (FOR) STRATEGIC MANAGING BY COMPETITIVE ABILITY AND INVESTMENT ATTRACTIVENESS

In this article, the essence of the Value-Based Management concept is considered, methods are analyzed for a corporate valuation, for determination of factors, which form it and for right decision criteria in business. Finally, the precedence rule needed for successful organization of a control procedure in the company, aimed at value creation, are discussed.

В. А. Кузнецова, Н. В. Васильев

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ

Рассмотрены проблемы реструктуризации российских промышленных предприятий и направления их решений. Анализируются методы оценки эффективности реструктуризации. Предлагаются критерии оценки, адекватные различным типам структурных преобразований.

С середины 90-х гг. XX в. реструктуризационные процессы в России стали характерны практически для всех отраслей. Преобразованиям подвергались банки, строительные организации, предприятия автомобильного, водного и воздушного транспорта. Но в наибольшей степени в проведении реструктуризации в силу своей специфики нуждались предприятия промышленности. Однако эффективность проведения реформ на российских промышленных предприятиях остается крайне низкой. Свидетельством служат данные Высшего арбитражного суда РФ. В период с 1998 по 2001 гг. на 4 542 предприятиях была введена процедура внешнего управления, и лишь на 237 предприятиях производство по делу о несостоятельности (банкротстве) было прекращено в связи с восстановлением платежеспособности должника.

Существуют как объективные, так и субъективные причины неудач реструктуризации, но факт существования предприятий, сумевших добиться процветания даже в крайне нестабильных внешних условиях, говорит о том, что определяющими являются именно субъективные факторы.

Большинство специалистов сходятся во мнении, что главной причиной неудач является некомпетентность аппарата управления. По нашему мнению, недостаточный уровень знаний и практических навыков менеджеров российских предприятий можно в определенной мере расценивать не как причину, а как следствие незавершенности теоретических аспектов некоторых проблем реструктуризации. В частности, до сих пор нет комплексной методики оценки эффективности реструктуризации промышленного предприятия. Для формирования такой методики необходимо четко определить понятие реструктуризации, создать научно-обоснованную классификацию, предложить методы и критерии оценки ее эффективности. В представленной статье основное внимание уделено анализу подходов к оценке эффективности реструктуризации.

На наш взгляд, под реструктуризацией следует понимать комплекс мероприятий, разрабатываемых инициатором и направленных на повышение эффективности деятельности предприятия как в краткосрочном, так и в долгосрочном периоде, за счет внутренних структурных преобразований.

Проводя классификацию структурных преобразований, основной акцент мы сделали на причинно-целевом классификационном признаке, согласно которому выделили три типа реструктуризации: антикризисный, адаптивный и тип развития. Критерии оценки реструктуризации, предложенные в данной статье, основываются именно на этой типизации.

В силу того что в развитых капиталистических странах операции на рынке корпоративного контроля осуществляются уже более 100 лет, анализ методов оценки эффек-

тивности реструктуризации целесообразно начинать с изучения методов, предложенных западными экономистами.

Простейший метод определения экономических выгод и издержек слияния был предложен С. Майерсом в 1976 г. По его мнению, чистая приведенная стоимость слияния может быть рассчитана как разность между приростом рыночной стоимости корпорации после слияния (эффект синергии) и издержками на совершение сделки, которые зависят от способа оплаты слияния:

$$NPV = \Delta P - E = [P_{AB} - (P_A + P_B)] - [CASH - P_B].$$

Из теории корпоративных финансов известно, что решения по финансированию проекта можно принимать только тогда, когда $NPV \geq 0$. Этот метод может быть использован в качестве базового для оценки эффективности некоторых типов реструктуризации. Он легко применяется в условиях развитости фондового рынка, так как основан на расчете рыночной стоимости компании. В России же фондовый рынок только формируется, и для применения этого метода на практике нужно использовать адаптированные технические приемы оценки бизнеса как публичных, так и частных компаний.

Рассмотрим методы количественной оценки слияний, наиболее часто применяемые западными участниками рынка корпоративного контроля.

Метод сравнительного анализа (*comparative analysis method*, CA) (иначе – метод сравнительных мультипликаторов [2]) заключается в последовательном проведении двух этапов [7]:

- из текущих сделок, проведенных на рынке корпоративного контроля, отбирается группа слияний, похожих на оцениваемую сделку, т. е. корпорации-цели схожи по индустрии, финансовым показателям, качеству менеджмента и т. п.;

- на основе специальной системы коэффициентов определяется рациональная стоимость покупки корпорации-цели. Для этого в группе отобранных корпораций находят наибольшее и наименьшее значения коэффициентов и с их помощью рассчитывают интервал стоимости.

Наиболее часто используют коэффициенты оплаченной доходности, CF, EBIT и др. [7]:

$$\text{Коэффициент оплаченной доходности} = P_T / EPS_T,$$

где P_T – стоимость приобретения одной акции корпорации-цели; EPS_T – значение коэффициента прибыли на акцию корпорации-цели.

В условиях неразвитости российского фондового рынка практически невозможно выявить поглощения, похожие на оцениваемую сделку, что затрудняет использование CA-метода в оценке эффективности проекта (в том числе реструктуризации). Более того, после определения

рациональной цены поглощения оценка будет незавершенна, так как неясно, каким образом эта цена отразится на благосостоянии акционеров корпорации-покупателя [7].

Метод дисконтирования потоков денежных средств (*discount cash flow method, DCF*) в России наиболее известен и часто применяется для оценки стоимости предприятия. Он проводится в четыре этапа [7]:

1) составление баланса потоков денежных средств (CF), ожидаемых в результате слияния [7], проводится по следующей формуле:

$$CF = OP(1 - ITR) + DAONC - (IWCI + CE),$$

где OP – операционная прибыль; ITR – ставка подоходного налога; DAONC – амортизация и иные безналичные расходы; CE, IWCI – дополнительные инвестиции в основную и оборотный капитал соответственно;

2) определение ставки дисконтирования. Может быть найдено как средневзвешенные издержки по привлечению капитала (WACC). Для расчета WACC доходность собственного капитала может быть найдена с помощью модели оценки финансовых активов (CAPM) или с использованием модели Гордона для оценки акций [7];

3) расчет максимально приемлемой цены покупки корпорации-цели. На данном этапе осуществляется дисконтирование денежных потоков с помощью применения моделей дисконтирования дивидендов (*divident discount models, DDM*) – моделей нулевого, постоянного или переменного роста.

4) расчет ожидаемой ставки доходности проведения слияния. Метод расчета идентичен методу нахождения внутренней нормы рентабельности проекта (IRR).

Преимуществом DCF-метода является то, что он учитывает в процессе анализа альтернативные издержки и временную стоимость денежных средств. Однако применение метода затрудняется необходимостью нахождения ставки дисконта и прогнозирования денежных средств.

Альтернативой DCF-методу является метод капитализации прибыли, предполагающий бесконечность будущих доходов. Ориентирами для ставки капитализации могут быть коэффициенты рентабельности (ROE, ROI), затраты на капитал (WACC), коэффициент цена–прибыль (*price-earnings, P / E*) [7]:

$$\text{Ставка капитализации} = 1 / \text{коэффициент } P / E.$$

Метод капитализации с вычислительной точки зрения проще DCF-метода, так как не требует расчета ежегодных денежных потоков, и по этой же причине он может оказаться менее точным. Он не применим для оценки проектов с колеблющимся во времени денежным потоком.

Поскольку реструктуризация представляет собой определенный тип проекта, мы проанализировали методы оценки инвестиционных проектов. В качестве основных критериев эффективности инвестиционных проектов рекомендуются NPV, IRR, PI и DPP [1 и др.]. На наш взгляд, данные показатели характеризуют сам проект, но не имеют отношения к объекту, на котором этот проект реализуется, а значит, не могут отражать степень достижения цели проекта, если он направлен на повышение эффективности деятельности объекта в целом. Исключение составляет показатель NPV, изменение которого отражает прирост стоимости предприятия, что может выступать в

качестве цели реструктуризации развития. Таким образом, для целей оценки эффективности реструктуризации может быть применим только DCF-метод, а точнее сказать – концепция дисконтирования денежных потоков.

Выбору целесообразных и наиболее эффективных мероприятий по реструктуризации может помочь формирование оптимизационной экономико-математической модели. Важнейшим элементом такой модели является критерий оптимальности. Это количественный или порядковый показатель, выражающий предельную меру экономического эффекта принимаемого решения для сравнительной оценки возможных решений (альтернатив) и выбора наилучшего из них.

По количеству целей различают одноцелевые и многоцелевые задачи принятия решений.

Выбор критерия одноцелевой задачи принятия решений зависит от условий, в которых решение принимается.

В условиях определенности, когда в точности известен результат каждого из альтернативных проектов, в качестве критерия могут выступать любые целевые показатели.

В условиях риска, когда результаты решений не являются определенными, но вероятность каждого результата известна, для принятия оптимальных решений могут применяться критерии Байеса, Ходжа–Лемана, Гермейера, критерий произведений и др. [3; 4]. Например, в соответствии с критерием Байеса в качестве оптимального выбирается решение, обеспечивающее максимальное (минимальное) значение математического ожидания дохода (потерь):

$$W = \max_i \sum_{j=1}^n W_{ij} p_j, \quad \text{если } W_{ij} - \text{доходы,}$$

где p_j – вероятность, соответствующая состоянию природы j ; i – порядковый номер оцениваемого решения (проекта), $i = 1, 2, \dots, m$; j – порядковый номер возможного состояния природы, $j = 1, 2, \dots, n$.

В условиях неопределенности, когда невозможно определить вероятность потенциальных результатов, применяют критерии Вальда, Сэвиджа, Гурвица и Лапласа [3; 4]. Например, в соответствии с критерием Вальда (критерием пессимизма) в качестве оптимального выбирается решение, обеспечивающее максимальный результат из минимально возможных:

$$W = \max_i (\min_j W_{ij}), \quad \text{если } W_{ij} - \text{доходы.}$$

Если в процессе принятия решения сложно отдать предпочтение одному из критериев, то целесообразно провести их анализ, выбрав оптимальные по разным критериям решения и сравнив их [4].

При оценке экономической эффективности аналитику, как правило, приходится решать многокритериальную задачу принятия решений.

Сложности векторной оптимизации привели к значительному распространению приемов линеаризации критериев. Известны аддитивные (A) и мультипликативные (M) индексы [4]:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i g_i \rightarrow \max (\min), M = \prod_{i=1}^n l_i g_i \rightarrow \max (\min), \sum_{i=1}^n g_i = 1,$$

где n – число показателей эффекта; l_j – частные показатели эффекта; g_i – коэффициенты значимости i -го параметра. Принципиальным недостатком данных критериев является то, что они допускают возможность компенсации недостатка одних качеств за счет избытка других.

Второй подход к формированию критериев состоит в том, что одну часть параметров эффекта (которые нужно улучшить) относят к числителю, а другую часть параметров (которые нужно уменьшить) – к знаменателю. Главным недостатком этого подхода является то, что, уменьшая знаменатель, при незначительной величине числителя можно обеспечить большое значение критерия, поэтому нужно накладывать ограничения на величину критерия или числителя, или знаменателя [4].

Третий подход состоит в том, что один из параметров эффекта максимизируют или минимизируют, а на остальные накладывают ограничения [4]. Однако в случае равной важности нескольких параметров сложно остановить свой выбор на каком-то одном из них.

В результате анализа критериального множества можно сделать следующие выводы:

- оценка эффективности реструктуризации представляет собой многокритериальную задачу, для решения которой аналитику необходимо привести ее к однокритериальной постановке;

- при решении однокритериальной задачи аналитику следует учитывать условия (определенность, риск, неопределенность), в которых оцениваются альтернативные проекты.

Открытым остается вопрос, на основании каких показателей (доход, рентабельность, прирост стоимости или др.) аналитику следует строить матрицу решений и выбирать оптимальный проект.

Анализ работ отечественных авторов (М. Д. Аистова, Л. П. Белых, С. В. Валдайцев, М. Голубев, А. Г. Грязнова, И. А. Егеров, М. А. Федотова и др.) приводит к выводу, что в качестве критерия оценки эффективности реструктуризации предлагается единственный показатель – прирост стоимости.

На наш взгляд, повсеместное использование прироста стоимости в качестве критерия оценки эффективности реструктуризации не обосновано. Применение этого критерия оправданно лишь в случае, когда целью преобразований является увеличение стоимости бизнеса. Данная цель может преследоваться при проведении реструктуризации развития. Но помимо реструктуризации развития предприятие может проводить антикризисную или адаптивную реструктуризацию. В этом случае оно будет стремиться к достижению иных целей, а значит для оценки необходимы иные критерии.

Реструктуризация в общем случае нацелена на повышение эффективности деятельности предприятия, следовательно в качестве критериев оценки целевой эффективности реструктуризации могут и должны использоваться показатели эффективности деятельности предприятия.

В общемировой практике наибольшее распространение получили четыре типа показателей оценки эффективности бизнеса: показатели оценки компании на фондовых рынках, финансовые показатели, нефинансовые показатели и показатели затрат [5]. В силу своей специфики для целей оценки эффективности реструктуризации применимы только финансовые и рыночные показатели.

На Западе наиболее распространенными финансовыми показателями являются коэффициенты рентабельности (ROA, ROI и ROS), значение прибыли, размер прибыли на акцию (EPS) и др. [5]. Но прибыль не учитывает

объем инвестиций и поэтому не может являться адекватным средством оценки эффективности реструктуризации. Не свободен от недостатков и показатель EPS, поэтому сотни зарубежных компаний, от «AT&T» до «Brahma Beer», отказались от его использования [5].

Среди показателей рентабельности многие компании, в частности «DuPont», отдадут предпочтение показателю ROI. Но поскольку этот критерий определяет инициатор оценки, то, с точки зрения собственника предприятия, наиболее целесообразно использовать другой показатель – рентабельность собственного капитала (ROE).

Эффективность бизнеса часто оценивается показателями финансовой устойчивости, ликвидности и оборачиваемости [7]. И хотя главная роль отводится показателям рентабельности, критерий оценки, на наш взгляд, в первую очередь должен соответствовать цели преобразований.

Среди рыночных показателей оценки в мировой практике наибольшее распространение получили рыночная стоимость, добавленная рыночная стоимость (*market value added, MVA*), курс акций, коэффициент P/E , общая доходность по акциям (*total shareholder return, TSR*) и др. [5; 7].

Необходимым условием использования рыночных показателей оценки бизнеса является наличие развитого фондового рынка, что нехарактерно для современной России, поэтому для оценки эффективности реструктуризации эти показатели продолжают оставаться трудноприменимыми.

В течение последних двадцати лет во всем мире ведется поиск новых показателей эффективности бизнеса. Примерами являются предложенный Б. Стюартом показатель экономической добавленной стоимости (*economic value added, EVA*), разработанная Р. Капланом и Д. Нортонгом система сбалансированных показателей (*Balanced Scorecard, BSC*), предложенный М. Мейером процессно-ориентированный анализ рентабельности (*activity-based profitability analysis, ABPA*) [4].

Показатель EVA зарегистрирован в качестве торговой марки компанией «Stern, Steward & Co.» [5; 6]:

$$EVA = NOPAT - WACC \cdot C = (ROI - WACC) \cdot C,$$

где NOPAT – чистая операционная прибыль после налогообложения; C – размер инвестированного капитала.

Если показатель EVA положителен, то стоимость компании за анализируемый период была увеличена; если отрицателен, то стоимость сократилась. По мнению ряда ученых, EVA в большей степени коррелирует с благосостоянием акционеров, чем EPS, ROE, IRR и другие традиционные показатели.

Система BSC объединяет в себе как финансовые, так и нефинансовые показатели четырех сфер деятельности предприятия: финансовой, работы с клиентами, внутренних бизнес-процессов, а также обучения и инноваций [5]. Общее число показателей не регламентируется. Например, в американской компании GFS система BSC построена на основе 32-х показателей [5].

Многочисленные исследования доказывают, что между общепринятыми показателями, используемыми в системах оценки эффективности, нередко обнаруживается очень слабая, а иногда и негативная корреляция. Значит, по совокупности этих показателей невозможно выбрать наиболее эффективный проект. Система BSC разрабатывалась как средство отражения стратегии компании, и

поэтому проблема совмещения неоднородных показателей в единую оценку эффективности выходит за ее пределы. Таким образом, система BSC в качестве оценочно-го критерия не применима.

Процессно-ориентированный анализ рентабельности АВРА, основой которого является процессно-ориентированный учет затрат (*activity-based costing*, ABC), имеет своей целью моделирование циклов роста и падения затрат на обслуживание клиентов в тех сферах бизнеса, в которых очень сложно отделить факторы затрат от факторов дохода (в сфере банковских, транспортных услуг и т. д.) [5]. Показатель АВРА может служить эффективным средством формирования ассортиментной политики компании, но, как отмечает автор этой методики М. Мейер [5], она не может дать оценку влияния на доходы тех действий менеджмента, которые выполняются в интересах всех клиентов и компании в целом, т. е. не может дать оценку эффективности реструктуризации.

Таким образом, проанализировав показатели эффективности деятельности предприятия, можно отметить следующее:

- целью адаптивной реструктуризации является приспособление предприятия к изменившимся условиям внешней среды и повышение его устойчивости. Под устойчивостью в данном контексте понимается стабильность финансово-экономических показателей деятельности предприятия. При выборе показателей, на основе которых целесообразно оценивать эффективность реструктуризации, на наш взгляд, предпочтение следует отдавать коэффициентам рентабельности или показателю EVA;

- целью реструктуризации развития является повышение стоимости предприятия, а целью антикризисной реструктуризации – предотвращение угрозы банкротства или, что равнозначно, восстановление платежеспособности. Поэтому в качестве критериев оценки их эффективности целесообразно использовать показатели стоимости и платежеспособности соответственно.

Проанализировав законодательство РФ, регламентирующее порядок оценки платежеспособности предприятия (Письмо Минэкономки РФ от 16.09.93 № АШ-598/6-210, Инструкция Сбербанка РФ от 26.10.93 № 26-р, утратившее силу Постановление Правительства РФ от 20.05.94 № 498, Приказ ФСФО РФ от 23.01.2001 № 16, Федеральный закон РФ от 26.10.2002 № 127-ФЗ, Положение Центрального банка России от 19.03.2003 № 218-П, Постановление Правительства РФ от 25.06.2003 № 367), можно сделать вывод, что в нормативно-правовых актах РФ в качестве показателей оценки платежеспособности предприятия предлагаются два типа коэффициентов:

- коэффициенты, характеризующие соотношение оборотных активов предприятия или отдельных их элементов с краткосрочными или суммарными обязательствами;

- коэффициенты, отражающие период возможного погашения суммарных обязательств или отдельных видов задолженности предприятия за счет выручки от реализации.

Недостаток коэффициентов первого типа является то, что они представляют собой статические показатели, рассчитываемые на определенную дату, и не учитывают способность предприятия генерировать поток денежных средств и уже за счет него погашать свои обязательства.

Коэффициенты второго типа являются динамическими, но их недостаток состоит в том, что расчет проводится на основе выручки от реализации и коэффициенты не учитывают потребность в оборотном капитале.

Российские ученые: М. И. Баканов, А. Д. Шеремет, И. Т. Балабанов, И. А. Бланк, Г. В. Савицкая, Е. С. Стоянова и др. – в своих трудах оценивают платежеспособность предприятия в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 20.05.94 № 498.

Существуют интегральные методики оценки платежеспособности, например методика Д. Дюрана. Она объединяет статические и динамические показатели. Но в силу того что платежеспособность, рассчитанная по методике Д. Дюрана, не отражает степень предотвращения угрозы банкротства предприятия, эта методика не применима для оценки целевой эффективности реструктуризации.

В работе В. А. Кузнецовой рассмотрен коэффициент денежного потока ($K_{дп}$), которому не свойственны недостатки статической природы коэффициента текущей ликвидности:

$$K_{дп} = \frac{\text{Денежный поток от операционной деятельности}}{\text{Текущие обязательства}}$$

Практика показывает, что у здоровых компаний $K_{дп} \geq 0,4$. Это означает, что компания может погасить текущие обязательства за счет денежного потока от операционной деятельности, накапливаемого в течение 2,5 лет. Однако законодательство РФ на восстановление платежеспособности должника отводит срок лишь в 2 года (максимальный срок финансового оздоровления и внешнего управления по Федеральному закону от 26.10.2002 № 127-ФЗ), а значит, минимум 20 % долга должно быть погашено за счет денежного потока от инвестиционной и (или) финансовой деятельности предприятия. Это еще раз демонстрирует несовершенство законодательства РФ в этой области.

В силу того что традиционные подходы и методы оценки стоимости хорошо изучены и описаны в научно-методической литературе, их анализ в данной статье не проводится.

В настоящее время российские компании стали использовать такие подходы, как реальные опционы (ROV), добавленная экономическая (EVA) и акционерная (SVA) стоимость.

Стоимость предприятия на основе показателя EVA рассчитывается по следующей формуле [6]:

$$\text{Firm value}_t = C_t + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{EVA_{t+i}}{(1+WACC)^i} = C_t + \sum_{i=1}^T \frac{EVA_{t+i}}{(1+WACC)^i} + \frac{EVA_{t+T}}{(WACC-g)(1+WACC)^T},$$

где g – ожидаемые темпы роста NOPAT в бессрочной перспективе. Преимущества применения подхода EVA связаны с адекватным и нетрудоемким определением степени достижения фирмой цели по увеличению рыночной стоимости [6].

Одной из наиболее перспективных современных разработок в теории оценки стоимости компании является модель Ольсона (*Edwards-Bell-Ohlson valuation model*, EBO). Подход, применяемый в модели Ольсона, тесно переплетается с концепцией EVA. Отличие между ними заключается только в том, что EVA охватывает весь инвестированный в компанию капитал, а EBO – только акционерный [8]:

$$EVA_t = NI_t - r_e \cdot B_{t-1} = (ROE_t - r_e)B_{t-1},$$

где NI_t – чистый доход за период t ; r_e – стоимость акционерного капитала; B_{t-1} – величина акционерного капитала, балансовая стоимость на начало периода t .

Стоимость компании (P_t), в соответствии с моделью Ольсона [8]:

$$P_t = B_t + \sum_{i=1}^T \frac{(ROE_{t+i} - r_e)B_{t+i-1}}{(1+r_e)^i} + \frac{(ROE_{t+T+1} - r_e)B_{t+T}}{r_e \cdot (1+r_e)^T}.$$

По мнению Ч. Ли [8], модель ЕВО имеет преимущества перед традиционными методами оценки. Она показывает, как богатство акционеров связано с данными отчета о прибылях и убытках и бухгалтерского баланса.

Как отмечает И. А. Егерев [2], подход, базирующийся на дисконтировании EVA, является частным случаем модели ЕВО. Поскольку оценка стоимости существенно зависит от точности прогноза EVA, Ольсоном была предложена идея авторегрессионной связи между оценочными переменными модели и имеющимися данными бухгалтерского отчета. Полагая $(ROE_{t+i} - r_e)B_{t+i-1} = \tilde{x}_{t+i}^a$, формулу модели ЕВО можно представить в следующем виде:

$$P_t = B_t + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{M[\tilde{x}_{t+i}^a]}{(1+r_e)^i}.$$

Ольсон преобразовал модель в линейную функцию, в которой текущая рыночная стоимость компании зависит от ее балансовой стоимости, чистого дохода, выплачиваемых дивидендов и скаляра v , выражающего прочую информацию о будущих доходах предприятия. Для этого была использована авторегрессионная модель первого порядка – AR(1) [2]:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{t+1}^a &= \omega \tilde{x}_t^a + \tilde{v}_t + \tilde{\varepsilon}_{1,t+1}, \\ \tilde{v}_{t+1} &= \gamma \tilde{v}_t + \tilde{\varepsilon}_{2,t+1}, \end{aligned}$$

где ω, γ – параметры авторегрессии; $v_t, \varepsilon_{1,t}, \varepsilon_{2,t}$ – параметры модели (случайные величины).

Западные ученые Дж. Хэнд и У. Ландсман путем эмпирических исследований вывели значения параметров авторегрессии: $\omega = 0,61, \gamma = 0,45$. Но российские компании отличаются от американских как экономическим окружением, так и применяемыми стандартами бухгалтерского учета и отчетности, а именно от этих факторов зависят параметры авторегрессии. Поэтому возможность практического применения данной модели ЕВО для определения стоимости российских компаний вызывает большие сомнения, по крайней мере до проведения аналогичных исследований на российском рынке [2].

Показатель акционерной добавленной стоимости (*shareholder value added, SVA*) был разработан А. Раппапортом и зарегистрирован в качестве торговой марки компанией «L.E.K. Consulting». SVA представляет собой прирост стоимости инвестированного капитала и рассчитывается по формуле

$$SVA_t = \frac{\Delta NOPAT_t}{WACC(1+WACC)^{t-1}} - \frac{\Delta C_t}{(1+WACC)^t},$$

где $\Delta NOPAT_t$ – изменение чистой операционной прибыли после налогообложения, $\Delta NOPAT_t = NOPAT_t - NOPAT_{t-1}$; ΔC_t – изменение инвестированного капитала, $\Delta C_t = C_t - C_{t-1}$.

Стоимость компании (P) на основе SVA рассчитывается по формуле [6]

$$P = \frac{NOPAT_1}{WACC} + \sum_{i=1}^T SVA_i + MSOI,$$

где MSOI – рыночная стоимость ценных бумаг и иных инвестиций (избыточные активы); $NOPAT_1 / WACC$ – рыночная стоимость инвестированного капитала в начале периода; T – прогнозный период (период конкурентных преимуществ).

Преимущества SVA заключаются в оценке первоначальной величины инвестированного капитала по рыночным данным, отсутствию необходимости проведения корректировок и учета стоимости, добавленной новыми инвестициями, в том же году, когда инвестиции были совершены.

По мнению А. Г. Грязновой [6], при корректном использовании методов оценки, базирующихся на денежных потоках и на концепциях EVA и SVA, стоимость компании будет одинакова, поэтому выбор метода в конечном счете зависит от индивидуальных предпочтений оценщика.

Существенным недостатком рассмотренных выше методов оценки стоимости предприятия является то, что они не учитывают гибкость оцениваемого бизнеса и способность менеджмента реагировать на негативные изменения внешней среды. Избавиться от подобного недостатка позволяет использование метода реальных опционов (*Real Options Valuation, ROV*).

Опцион (от англ. *option* – выбор или право выбора) – это финансовый инструмент, дающий его владельцу право купить или продать по установленной цене оговоренный в опционе актив в определенный момент или на определенном интервале времени [1]. Реальный опцион представляет собой возможность совершения предприятием каких-либо действий в будущий момент времени или отказа от них [6]. По сути он подобен финансовому опциону. Для оценки бизнеса наибольшее значение имеют следующие типы реальных опционов [1; 6]: опцион отсрочки, опцион на регулирование масштабов, опцион на прекращение деятельности, опцион на изменение продукции и опцион роста. Они могут рассматриваться как аналоги американского или европейского типов фондовых опционов на продажу (*put*) или покупку (*call*) акций.

Как отмечено в работе А. Г. Грязновой [6], ROV-метод не является альтернативой традиционному DCF-методу, а лишь дополняет его в условиях высокой неопределенности:

$$NPV_s = NPV_p + ROV,$$

где NPV_s – стратегический показатель NPV; NPV_p – пассивное значение NPV, рассчитанное на основе традиционного DCF-метода; ROV – стоимость опционов активных действий менеджмента оцениваемой компании.

Для исчисления стоимости опционов могут применяться модели с дискретным и непрерывным изменением цены актива [1; 6].

Модель с дискретным изменением цены актива (биномиальная модель оценки стоимости европейского опциона call) была предложена Дж. Коксом, С. Россом и М. Рубинштейном:

$$C = \frac{1}{(1+R)^t} \left[\sum_{i=i^*}^t \frac{t!}{i!(t-i)!} q^i (1-q)^{t-i} (S \cdot h^i \cdot k^{t-i} - X) \right],$$

где C – стоимость европейского опциона call; R – безрисковая ставка процентов за один шаг; t – количество шагов (время действия опциона); $i^* = \max \{0, \square\}$, \square – минимальное целое i , для которого выполняется условие