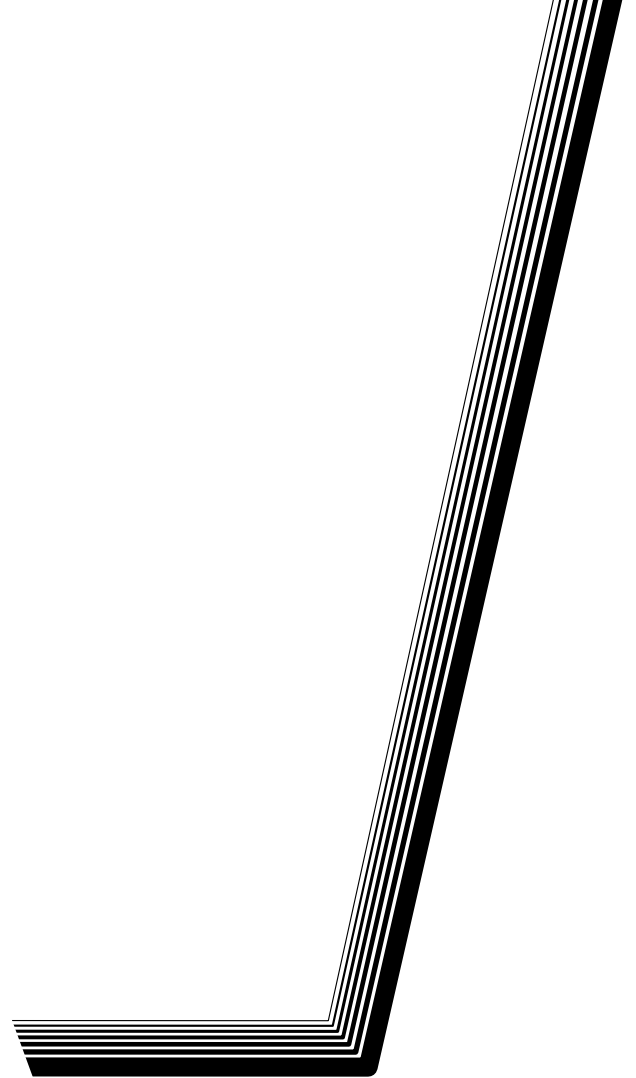


ВЕСТНИК



Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 1 (47)

Красноярск 2013

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 1(47)

Главный редактор

доктор технических наук
Ковалев И. В.

Заместители главного редактора:

доктор физико-математических наук
Логинов Ю. Ю.

доктор физико-математических наук
Сенашов С. И.

доктор технических наук
Мурыгин А. В.

кандидат технических наук
Зеленков П. В. (отв. секретарь)

Редакционная коллегия:

Аплеснин С. С.
Головенкин Е. Н.
Ерыгин Ю. В.
Лаптенко В. Д.
Ловчиков А. Н.
Медведев А. В.
Михеев А. Е.
Москвичев В. В.
Сафонов К. В.
Смирнов Н. А.
Сомов В. Г.

Учредитель

Сибирский
государственный
аэрокосмический
университет
имени академика
М. Ф. Решетнева

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева» (Вестник СибГАУ) – межрегиональный научный журнал, содержащий результаты научных исследований в области естественных, технических и прикладных наук по вопросам проектирования, производства и эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники, а также экономики.

Представленные в журнал статьи публикуются после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции (www.vestnik.sibsau.ru)

Периодичность – 4 раза в год
Специальный выпуск – 1 раз в год

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (<http://www.elibrary.ru>)

и сайте журнала (www.vestnik.sibsau.ru)

Журнал включен в каталоги:
русской прессы «Роспечать» (МАП) – 11399;
объединенный «Пресса России» – 39263

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, проспект имени газеты
«Красноярский рабочий», 31, П-415
Тел./ факс (391)291-90-19
E-mail: vestnik@sibsau.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия, свидетельство ПИ № ФС77-22189 от 27.10.2005 г.

Журнал включен 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»

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Вестник СибГАУ» ссылка обязательна

Редакторы: Е. Г. Некрасова, Т. Е. Ильющенко,
О. А. Плехова, Т. А. Ермолаева, О. А. Кругликова
Редактор английского текста А. Г. Никитина
Оригинал-макет и верстка Л. В. Звонаревой
Подписано в печать 29.03.2013. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 28,0.
Уч.-изд. л. 35,8. Тираж 1000 экз. Заказ 87/185. С 1/13.
Редакционно-издательский отдел
Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
660014, г. Красноярск,
просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
Отпечатано ООО РПБ «Амальгама».
660061, г. Красноярск, ул. Калинина, 53

РАЗДЕЛ
1



МАТЕМАТИКА,
МЕХАНИКА,
ИНФОРМАТИКА



К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ В КЛЮЧЕВОМ РЕЖИМЕ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ

С. С. Абрамов, А. М. Михеенко, А. С. Гусельников, Е. С. Абрамова, И. И. Павлов

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Россия, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86. E-mail: abramov@sibsutis.ru

Приводятся результаты анализа частотной зависимости основных энергетических показателей ключевого усилителя с последовательным контуром, работающим без перестройки колебательной системы.

Ключевые слова: ключевой усилитель, полоса частот, энергетические соотношения.

ON THE QUESTION OF IMPROVING THE QUALITATIVE CHARACTERISTICS OF A POWER AMPLIFIER IN A KEY MODE WITH SERIES CIRCUIT

S. S. Abramov, A. M. Mikheenko, A. S. Guselnikov, E. S. Abramova, I. I. Pavlov

Siberian State University of Telecommunications and Informatics
86 Kirov street, Novosibirsk, 630102, Russia. E-mail: abramov@sibsutis.ru

The authors present results of analysis of frequency dependence of the main energy indicators of series circuit key amplifier, operating without rearrangement of oscillating system.

Keywords: key amplifier, frequency band, energy ratio.

Ключевой усилитель с последовательным контуром (рис. 1) по существу представляет собой разновидность схемы инвертора, применяемого в силовой преобразовательной технике. Главное его достоинство – высокий КПД, достигающий 90...95 %. Однако реализовать это достоинство удастся лишь на сравнительно низких частотах (до 150...200 МГц в транзисторном варианте). Кроме того, при работе в полосе частот требуется перестройка колебательной системы, что осложняет конструкцию усилителя и снижает его надежность. Предлагаемый ниже анализ рассматриваемой схемы позволяет сделать выводы о допустимых пределах расстройки колебательной системы для приемлемых значений энергетических показателей усилителя.

Эквивалентная схема усилителя. Один из вариантов схемы инвертора с последовательным контуром приведен на рис. 1, а. Непосредственный анализ этой схемы затруднен, так как она может быть описана дифференциальным уравнением не ниже третьего порядка. Задачу можно упростить при следующих условиях:

- резонансная частота последовательного контура ω_0 близка к частоте возбуждения (переключения) ω ;
- затухание контура $L_k C_k R_n$ достаточно мало:

$$R_n \sqrt{\frac{C_k}{L_k}} \ll 1; \quad (1)$$

– внутреннее сопротивление транзистора для мгновенных значений анодного тока (в открытом состоянии) по крайней мере не больше сопротивления нагрузки R_n :

$$R < R_n; \quad (2)$$

– напряжение возбуждения имеет форму меандра.

При этих условиях $Z_n \approx R_n / \cos \varphi$; транзисторы можно заменить эквивалентными ключами с потерями, а последовательный контур усилителем тока имеет синусоидальную форму $i = I \sin(\omega t + \varphi)$, где φ – фазовый сдвиг контурного тока, обусловленный расстройкой.

В результате усилитель может быть представлен эквивалентной схемой (рис. 1, б), где C_0 – выходная емкость транзистора.

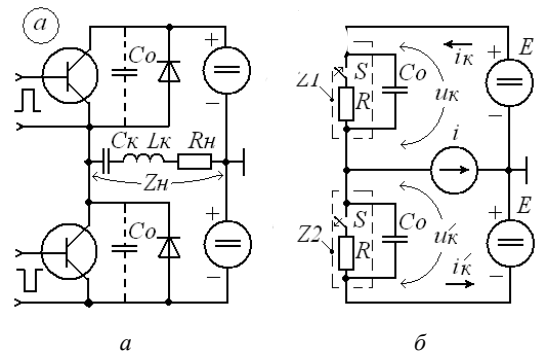


Рис. 1. Схема усилителя с последовательным контуром

Амплитуду возбуждения выберем такой, чтобы в открытом состоянии сопротивление транзистора было минимальным, т. е. определялось линией критического режима (или сопротивлением насыщения):

$$R = \frac{1}{S_{kp}} = r_{нас}, \quad (3)$$

где S_{kp} – крутизна линии критического режима.

Поскольку переключение цепей осуществляется ключами поочередно, то для полных сопротивлений ключей Z можно записать следующие выражения:

$$Z_1 = \frac{2R}{1 - Sq\omega t}, \quad (4)$$

$$Z_2 = \frac{2R}{1 + Sq\omega t}, \quad (5)$$

$$\text{где } Sq\omega t = \begin{cases} 1 \dots nT < t < (n+1)\frac{T}{2}, \\ -1 \dots (2n+1)\frac{T}{2} < t < (n+1)T, \end{cases}$$

$$\text{или } Sq\omega t = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\omega t}{2n-1}. \quad (6)$$

С учетом принятых обозначений (4) и (5), эквивалентную схему (см. рис. 1, б), можно описать линейным неоднородным дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{du_k}{dt} + \frac{1}{2RC_0} u_k = \frac{E}{2RC_0} (1 + Sq\omega t) - \frac{1}{2C_0} \sin(\omega t + \varphi),$$

или с учетом (6)

$$\frac{du_k}{dt} + \frac{1}{2RC_0} u_k = \frac{E}{2RC_0} \left[1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\omega t}{2n-1} \right] - \frac{1}{2C_0} \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

Периодическое решение этого уравнения нетрудно найти методами гармонического синтеза [1]:

$$u_k(t) = 2E \left[1 - \frac{e^{-\frac{t-\frac{T}{2}}{2RC_0}}}{1 + e^{-\frac{T}{4RC_0}}} \right] - \frac{IR \sin(\omega t - \varphi_1 + \varphi)}{\sqrt{1 + (2\omega RC_0)^2}}, \quad (8)$$

на интервале $nT < t < (n+1)\frac{T}{2}$, и

$$u_k(t) = \frac{2Ee^{-\frac{t}{2RC_0}}}{1 + e^{-\frac{T}{4RC_0}}} - \frac{IR \sin(\omega t - \varphi_1 + \varphi)}{\sqrt{1 + (2\omega RC_0)^2}} \quad (9)$$

на интервале $(2n+1)\frac{T}{2} < t < (n+1)T$.

Это же решение можно записать в виде ряда Фурье:

$$u_k(t) = E \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin[(2n-1)\omega t - \varphi_n]}{(2n-1)\sqrt{1 + [2\omega RC_0(2n-1)]^2}} \right\} - \frac{IR \sin(\omega t - \varphi_1 + \varphi)}{\sqrt{1 + (2\omega RC_0)^2}}, \quad (10)$$

Здесь и в предшествующих двух выражениях

$$\varphi_n = \arctg((2n-1)2\omega RC_0). \quad (11)$$

Выражение (10) позволяет найти амплитуду напряжения первой гармоники.

Полагая, что $IR \ll E$, получим

$$U_1 \approx \left(\frac{4E}{\pi} - IR \cos \varphi \right) \frac{1}{\sqrt{1 + (2\omega RC_0)^2}}.$$

Форму импульса тока можно определить следующим выражением:

$$i_k = \frac{u_k(t)}{Z_1}.$$

Тогда на интервале $nT < t < (n+1)\frac{T}{2}$, $i_k = 0$, и

$$i_k = \frac{2Ee^{-\frac{t}{2RC_0}}}{R \left(1 + e^{-\frac{T}{4RC_0}} \right)} + I \frac{\sin(\omega t - \varphi_1 + \varphi)}{\sqrt{1 + (2\omega RC_0)^2}}, \quad (12)$$

на интервале $(2n+1)\frac{T}{2} < t < (n+1)T$.

Основные энергетические соотношения в ключевом усилителе. Ограничимся рассмотрением области малых значений φ_1 в (11):

$$\varphi_1 = \arctg 2\omega C_0 R < 10^\circ, \quad 2\omega RC_0 \ll 1, \quad \varphi_1 \approx 2\omega C_0 R. \quad (13)$$

Как будет показано ниже, уже в этой области происходит существенное ухудшение энергетических показателей ключевого усилителя.

С учетом (13) можно приближенно определить амплитуду контурного тока:

$$I = \frac{U_n}{Z_n} \cong \frac{U_1}{Z_n} = \frac{\left(\frac{4E}{\pi} - IR \cos \varphi \right) \cos \varphi}{R_n}, \quad (14)$$

или после приведения подобных членов

$$I = \frac{4E}{\pi \left(R \cos \varphi + \frac{R_n}{\cos \varphi} \right)}. \quad (15)$$

Определим постоянную составляющую тока на основании (12) и (15):

$$I_{k0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left[\frac{\frac{2Ee^{-\frac{t}{2RC_0}}}{R \left(1 + e^{-\frac{T}{4RC_0}} \right)} + \frac{4E \sin(\omega t - \varphi_1 + \varphi)}{\pi \left(R \cos \varphi + \frac{R_n}{\cos \varphi} \right) \sqrt{1 + (2\omega RC_0)^2}} \right] d\omega t.$$

После простых преобразований получим

$$I_{k_0} = \frac{4E}{\pi^2 R} \left\{ \frac{\pi \omega R C_0 \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2\omega R C_0}} \right)}{2 \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2\omega R C_0}} \right)} + \frac{\cos(\varphi - \varphi_1)}{\left[1 + (2\omega R C_0)^2 \right] \left(\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi} \right)} \right\},$$

или, принимая во внимание (13),

$$I_{k_0} \approx \frac{4E}{\pi^2 R} \left(\frac{\pi \omega R C_0}{2} + \frac{\cos(\varphi - \varphi_1)}{\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi}} \right). \quad (16)$$

Мощность, потребляемая от источника питания одним транзистором,

$$P_0 = E I_{k_0} = \frac{4E^2}{\pi^2 R} \left(\frac{\pi \omega R C_0}{2} + \frac{\cos(\varphi - \varphi_1)}{\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi}} \right). \quad (17)$$

Для колебательной мощности, отдаваемым одним транзистором в нагрузку, на основании (15) получим следующее выражение:

$$P_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{I^2 R_H}{2} \right) = \frac{4E^2 \frac{R_H}{R}}{\pi^2 R \left(\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi} \right)^2}, \quad (18)$$

а затем определим мощность потерь на транзисторе:

$$P_a = \frac{4E^2}{\pi^2 R} \left[\frac{\cos(\varphi - \varphi_1)}{\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi}} - \frac{\frac{R_H}{R}}{\left(\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi} \right)^2} + \frac{\pi \omega R C_0}{2} \right]. \quad (19)$$

Два первых слагаемых в (19) характеризуют потери на транзисторе, обусловленные протеканием контурного тока i . Третье слагаемое учитывает потери, вызванные разрядным током выходной емкости лампы. Наличие именно этого слагаемого приводит к увеличению потерь и уменьшению КПД на повышенных частотах.

Выражения (17) и (18) позволяют определить электронный КПД усилителя:

$$\eta = \frac{P_1}{P_0} = \frac{\frac{R_H}{R}}{\left(\frac{\pi \omega R C_0}{2} + \frac{\cos(\varphi - \varphi_1)}{\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi}} \right) \left(\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi} \right)^2} =$$

$$= \frac{\frac{R_H}{R}}{\left(\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi} \right) \left[\cos(\varphi - \varphi_1) + \frac{\pi \omega R C_0}{2} \left(\cos \varphi + \frac{R_H}{R \cos \varphi} \right) \right]}. \quad (20)$$

Рассмотрим вариант настройки контура в резонанс ($\varphi = 0$; $\omega = \omega_0$). В этом случае (20) с учетом (13) примет вид

$$\eta(\omega_0) = \frac{\frac{R_H}{R}}{\left(1 + \frac{R_H}{R} \right) \left[\cos \varphi_1 + \frac{4\varphi_1}{\pi} \left(1 + \frac{R_H}{R} \right) \right]}. \quad (21)$$

Семейство зависимостей (21) приведено на рис. 2.

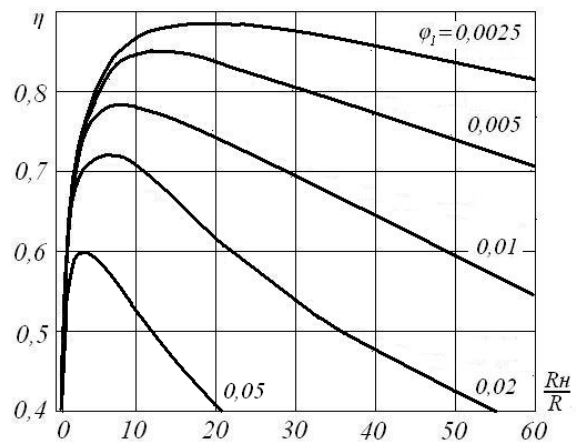


Рис. 2. Нагрузочные характеристики усилителя

Из (21) следует, что каждому значению φ_1 соответствует определенное оптимальное значение сопротивления нагрузки R_H , которое можно найти путем исследования (21) на экстремум:

$$\left(\frac{R_H}{R} \right)_{\text{opt}} = \sqrt{1 + \frac{\pi}{4\varphi_1}}. \quad (22)$$

Выражение (21) подтверждает справедливость ограничения области рассматриваемых значений φ_1 . Действительно, уже при $\varphi_1 = 3^\circ$ (0,05 рад) максимальное возможное значение КПД не превышает 0,6.

Рассмотрим теперь зависимость энергетических показателей усилителя от расстройки нагрузочной цепи. Для этого в дальнейшем воспользуемся понятием обобщенной расстройки [2]:

$$\chi = \text{tg} \varphi = \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) Q \approx 2 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) Q, \quad (23)$$

где Q – нагруженная добротность контура.

Предположим, что в пределах рабочей полосы усилителя допустимо снижение КПД до $k \cdot \eta(\omega_0)$ и рассмотрим зависимость энергетических показателей усилителя от расстройки нагрузочной цепи при оптимальном сопротивлении нагрузки.

Выражение (21) в этом случае примет вид

$$k \cdot \eta(\omega_0) = \frac{\left(\frac{R_H}{R}\right)_{\text{opt}}}{\left[\cos \varphi + \left(\frac{R_H}{R}\right)_{\text{opt}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi} \right] \left\{ \cos(\varphi - \varphi_1) + \frac{4}{\pi} \varphi_1 \left[\cos \varphi + \left(\frac{R_H}{R}\right)_{\text{opt}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi} \right] \right\}}. \quad (24)$$

С учетом (23) это выражение можно решить в виде $\chi_{\text{доп}} = \text{tg}(\varphi_{\text{доп}}) = f(\varphi_1, k)$, где $\chi_{\text{доп}}$ и $\varphi_{\text{доп}}$ – допустимые значения обобщенной расстройки и фазового сдвига контурного тока при фиксированном φ_1 и заданной величине снижения КПД (k).

Результаты этого решения представлены на рис. 3.

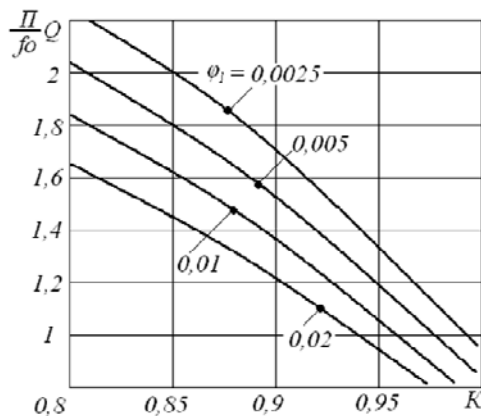


Рис. 3. Полоса рабочих частот усилителя:
 $\Pi = 0,5(\chi_1 + \chi_2)$; $\chi_1 = \chi(\omega_{\text{доп}} - \omega_0) \dots \omega > \omega_0$;
 $\chi_2 = \chi(\omega_0 - \omega_{\text{доп}}) \dots \omega < \omega_0$

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- на умеренно высоких частотах ($\varphi = 0,0025 - 0,005$) при допустимом снижении КПД на 20 % полоса рабочих частот усилителя может достигать удвоенной полосы пропускания контура на уровне 3 дБ;
- на высоких частотах ($\varphi > 0,01$) падает и резонансное значение КПД и допустимая полоса рабочих частот;
- рабочую полосу частот можно регулировать подбором нагруженной добротности контура.

Библиографические ссылки

1. Заездный А. М. Гармонический синтез в радиотехнике и электросвязи. М. : Госэнергоиздат, 1961. 535 с.
2. Бакалов В. П., Дмитриков В. Ф., Крук Б. И. Основы теории цепей : учебник для вузов ; под ред. В. П. Бакалова. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Горячая линия – Телеком, 2007. 426 с. : ил.

© Абрамов С. С., Михеенко А. М., Гусельников А. С.,
 Абрамова Е. С., Павлов И. И., 2012

УДК 004.93:621.31

РАЗРАБОТКА НАВИГАЦИОННОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А. М. Алешечкин¹, Г. К. Макаренко²

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28. E-mail: aleshechkin.andrej@yandex.ru

²ОАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Сибири»

Россия, 660021, г. Красноярск, ул. Богграда, 144а. E-mail: MakarenkoGK@gmail.com

Предложен алгоритм навигационного фильтра, реализующий получение сглаженных оценок координат объектов на основе измеренных значений псевдодальностей, полученных для сигналов совмещенного созвездия навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS.

Ключевые слова: навигационная задача, фильтр Калмана, ГЛОНАСС, GPS.

DEVELOPMENT OF NAVIGATION FILTER FOR ACCURACY INCREASE OF COORDINATES OF POINTS OF THERMAL IMAGES AT REMOTE DIAGNOSIS OF OVERHEAD POWER LINES

A. M. Aleshechkin¹, G. K. Makarenko²

¹Siberian Federal University

28 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: aleshechkin.andrej@yandex.ru

²JSC "Interregional Distribution Grid Company of Siberia"

144a Bograd street, Krasnoyarsk, 660021, Russia. E-mail: MakarenkoGK@gmail.com

In the article the authors offer an algorithm of navigation filter which makes possible to obtain the estimations of objects coordinates on the basis of the measured pseudoranges, obtained for signals of the co-located constellation of navigation satellites of GLONASS and GPS.

Keywords: navigation task, Kalman filter, GLONASS, GPS.

В настоящее время актуальной задачей энергетических систем является повышение эффективности методов диагностики энергетического оборудования.

Авторами статьи в работах [1; 2] предложен комплекс диагностики воздушных линий электропередачи, объединяющий в себе беспилотный летательный аппарат (БПЛА), навигационную аппаратуру спутниковых радионавигационных систем (НАП СРНС) и средства получения фото- и тепловизионных изображений. Данный комплекс обеспечивает координатную привязку получаемых фото- и тепловизионных изображений на основе использования координат и угловой ориентации БПЛА, получаемых от НАП СРНС, высоты полета над Землей, а также известных значений углов обзора средств получения изображений.

При решении задачи координатной привязки получаемых в ходе диагностики изображений, в настоящее время используется информация, получаемая в процессе решения стандартной навигационно-временной задачи [3]. При этом получаемые значения координат оказываются весьма подверженными влиянию случайной погрешности измерения псевдодальностей.

Вместе с тем при проведении съемки энергетических объектов (например, воздушных линий электропередачи) траектория БПЛА является достаточно гладкой, что открывает возможность эффективной фильтрации измеряемых координат БПЛА. Использование такой фильтрации позволяет ожидать значительного снижения случайной погрешности определения координат объектов, вызванной наличием шумовой погрешности измерения псевдодальностей в НАП СРНС.

Исходя из этого, в данной статье ставится задача разработки и исследования навигационного фильтра, предназначенного для решения навигационной задачи и фильтрации координат БПЛА, что позволит улучшить метрологические характеристики комплекса диагностики энергетических объектов.

В первом приближении для решения поставленной задачи предлагается фильтр Калмана [4], решающий навигационную задачу с фильтрацией измеренных НАП СРНС псевдодальностей для каждого навигационного космического аппарата (НКА) СРНС ГЛОНАСС и GPS. При этом в полученной системе уравнений будет содержаться n уравнений (по числу принимаемых НКА) с пятью неизвестными, которыми являются три пространственные координаты и две поправки к шкале времени потребителя относительно системного времени СРНС ГЛОНАСС и GPS.

Исходя из вышесказанного вектор состояний проектируемого фильтра Калмана имеет вид

$$\mathbf{S}_k = [x_k \ y_k \ z_k \ \Delta\tau\Gamma_k \ \Delta\tau G_k]^T, \quad (1)$$

где x_k, y_k, z_k – значения координат объекта на k -м шаге; $\Delta\tau\Gamma_k, \Delta\tau G_k$ – значения разницы шкал времени НАП и НКА СРНС ГЛОНАСС и GPS на k -м шаге сопровождения, соответственно.

В случае задания модели движения объекта как неподвижного, возмущаемого случайными изменениями скорости распространения, уравнение состояний будет иметь вид

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + V_{x,k} \cdot T, \\ y_{k+1} = y_k + V_{y,k} \cdot T, \\ z_{k+1} = z_k + V_{z,k} \cdot T, \\ \Delta\tau\Gamma_{k+1} = \Delta\tau\Gamma_k + V_{\Delta\tau\Gamma,k} \cdot T, \\ \Delta\tau G_{k+1} = \Delta\tau G_k + V_{\Delta\tau G,k} \cdot T, \end{cases} \quad (2)$$

где $V_{x,k}, V_{y,k}, V_{z,k}$ – случайные значения скорости объекта по соответствующим координатам с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями σ_v^2 , полученные на k -м шаге сопровождения; $V_{\Delta\tau\Gamma,k}, V_{\Delta\tau G,k}$ – случайные значения скорости изменения разницы шкал времени НАП и НКА для СРНС ГЛОНАСС и GPS (шум скорости) с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями $\sigma_{V\Delta\tau\Gamma}^2$ и $\sigma_{V\Delta\tau G}^2$ соответственно; T – интервал дискретизации, т. е. шаг обновления измерений (или состояний) объекта.

Уравнение (2) можно записать в матричном виде:

$$\mathbf{S}_{k+1} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{S}_k + \mathbf{G} \cdot \mathbf{V}_k, \quad (3)$$

где $\mathbf{S}_k$ и $\mathbf{S}_{k+1}$ – состояние объекта на k и $k+1$ -м шаге фильтрации; $\mathbf{\Phi} = \text{diag}(5 \times 5)$ – диагональная единичная матрица переходов вектора состояний от измерения к измерению, где $\text{diag}()$ – символ диагональной матрицы;

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} T \cdot \sigma_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T \cdot \sigma_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T \cdot \sigma_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T \cdot \sigma_{V\Delta\tau\Gamma} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T \cdot \sigma_{V\Delta\tau G} \end{bmatrix} -$$

вектор коэффициентов усиления шума состояний;

$\mathbf{V}_k = [V_{x,k} \ V_{y,k} \ V_{z,k} \ V_{\Delta\tau\Gamma,k} \ V_{\Delta\tau G,k}]^T$ – вектор случайных скоростей на k -м шаге фильтрации.

Исходя из заданных значений дисперсии шума состояний можно найти ковариационную матрицу шума состояний:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{G}^T. \quad (4)$$

В случае определения места объекта в псевдодальномерном режиме результаты измерений представляют собой псевдодальности НАП–НКА $R_1, R_2, \dots, R_n$, где n – число принимаемых НКА.

Вектор измеренных значений псевдодальностей ОС–КС на k -м шаге фильтрации запишется в виде

$$\mathbf{Z}_k = [R_{1,k} \quad \dots \quad R_{n,k}]^T. \quad (5)$$

Матрица перехода пространства состояний в пространство измерений вычисляется для значений координат объекта и разницы шкал времени, выбираемых из отфильтрованного вектора состояний $\mathbf{S}_k$, определенного для текущего шага сопровождения в соответствии с выражением

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} -kx_{1,k} & -ky_{1,k} & -kz_{1,k} & \frac{\partial R_1}{\partial \Delta\tau\Gamma_k} & \frac{\partial R_1}{\partial \Delta\tau G_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -kx_{n,k} & -ky_{n,k} & -kz_{n,k} & \frac{\partial R_n}{\partial \Delta\tau\Gamma_k} & \frac{\partial R_n}{\partial \Delta\tau G_k} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $kx_{i,k} = \frac{xn_i - x_k}{R_{0i,k}}$ – направляющие косинусы векторов-направлений, соединяющих точку начального приближения с i -м НКА, здесь $xn_i - x$ координата i -го НКА (аналогично для $ky_{i,k}$, $kz_{i,k}$); $i = 1, \dots, n$ – текущий номер принимаемого НКА,

$R_{0i,k} = \sqrt{(xn_i - x_k)^2 + (yn_i - y_k)^2 + (zn_i - z_k)^2}$ – значение дальности от точки начального приближения до i -го НКА.

Ковариационная матрица погрешностей измерения псевдодальностей $\mathbf{R}$ может в первом приближении быть предвычисленной для фиксированных значений погрешностей измерения псевдодальности. В этом случае можно положить измерения дальностей НАП–НКА равноточными, т. е. принять дисперсии погрешностей измерения дальностей одинаковыми, равными σ_R^2 . При этом значения погрешностей измерения дальностей принимаются некоррелированными, следовательно

$$\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_R^2). \quad (7)$$

Остальные основные уравнения фильтра Калмана широко известны [4] и использованы в классическом виде.

Перед началом фильтрации на выход фильтра поступает первое значение вектора состояний, получаемое путем решения стандартной навигационной задачи. Для стационарного объекта вектор состояния (1) – это координаты объекта и разницы шкал времени потребителя и соответствующего НКА. Далее эти переменные экстраполируются в соответствии с уравнением экстраполяции (3). При этом ковариационная матрица погрешностей оценки состояния объекта определяется на основе теории погрешностей косвенных измерений из матрицы погрешностей измерения радионавигационных параметров $\mathbf{R}$, которая, как было

отмечено выше, полагается заранее известной. После нахождения ковариационной матрицы погрешностей состояния объекта на первом шаге $\mathbf{P}_{1/1}$ осуществляется расчет $\mathbf{P}_{2/1}$, а затем вычисляется коэффициент усиления фильтра на следующий шаг $\mathbf{K}_2$ по известным выражениям [4], т. е. со второго шага фильтр при стационарной модели состояния объекта начинает работать в установившемся режиме.

Моделирование разработанного фильтра производилось при следующих исходных данных: $\sigma_p = 40$ м [3] – среднеквадратические отклонения (СКО) измеряемых НАП псевдодальностей от НКА до НАП; $\sigma_v, \sigma_v^2 = 1$ м/с – СКО случайных скоростей объекта; $\sigma_{V\Delta\tau\Gamma} = \sigma_{V\Delta\tau G}$, $\sigma_v^2 = 10^{-6}$ с/с – СКО случайных скоростей изменения разницы шкал времени НКА и НАП; $z = 1000$ – число статистических испытаний.

В результате моделирования фильтра получены СКО погрешностей определения прямоугольных геоцентрических фильтрованных координат точки: $\sigma_X = 1,3$ м; $\sigma_Y = 3$ м; $\sigma_Z = 3$ м. В то же время решение стандартной навигационной задачи по результатам одномоментных измерений без фильтрации дает следующие значения СКО определения не фильтрованных координат заданной точки $\sigma_{Xn} = 22$ м, $\sigma_{Yn} = 33$ м, $\sigma_{Zn} = 50$ м.

Результаты определения координат точки при фильтрации и без нее (решение стандартной навигационной задачи по результатам одномоментных измерений) приведены на рис. 1.

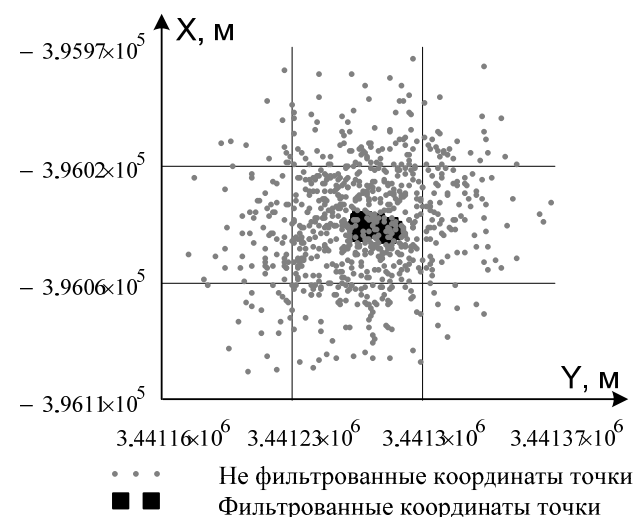


Рис. 1. Результаты моделирования фильтра Калмана

Полученные значения СКО погрешностей определения координат точки до и после фильтрации были использованы в программе, моделирующей процесс координатной привязки тепловизионных изображений для разработанного авторами статьи комплекса диагностики [1; 2]. Погрешности координатной привязки получаемых изображений рассчитаны методами

статистического моделирования, исходя из которых на измеряемые исходные параметры накладывались погрешности в виде случайных величин с заданными значениями СКО и нулевыми математическими ожиданиями. Затем проводилось заданное число статистических испытаний, в результате которых рассчитывались статистические оценки СКО определяемых параметров. В частности, был произведен расчет зависимости СКО погрешности определения пространственных координат одной из точек тепловизионного

изображения от угла азимута БПЛА, в соответствии с выражениями:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}, \sigma_{rn} = \sqrt{\sigma_{xn}^2 + \sigma_{yn}^2 + \sigma_{zn}^2}, \quad (8)$$

где σ_{xn} , σ_{yn} , σ_{zn} , σ_x , σ_y , σ_z – СКО погрешности определения прямоугольных геоцентрических координат точки до и после фильтрации, соответственно.

Расчеты проводились при исходных данных, отраженных в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные при моделировании разработанного навигационного фильтра

Наименование	Значение	СКО 1	СКО 2
Широта БПЛА	$\text{lat} = 56^{\circ}0' \text{ с. ш.}$	$\sigma_{\text{lat}} = 0,711'' \text{ (22 м)}$	$\sigma_{\text{lat}} = 0,042'' \text{ (1,3 м)}$
Долгота БПЛА	$\text{lon} = 92^{\circ}0' \text{ в. д.}$	$\sigma_{\text{lon}} = 1,904'' \text{ (33 м)}$	$\sigma_{\text{lon}} = 0,173'' \text{ (3 м)}$
Высота БПЛА	$h = 400 \text{ м}$	$\sigma_h = 50 \text{ м}$	$\sigma_h = 3 \text{ м}$
Азимут БПЛА	$az = 0^{\circ}, 1^{\circ}, \dots, 360^{\circ}$	$\sigma_{az} = 10'$	
Угол места БПЛА	$um = 0^{\circ}$	$\sigma_{um} = 20'$	
Крен БПЛА	$kr = 0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}, 30^{\circ}$	$\sigma_{kr} = 20'$	
Углы обзора камеры тепловизора	$ax = 29^{\circ}, ay = 22^{\circ}$	–	
Высота БПЛА	$dh = 150 \text{ м}$	$\sigma_{dh} = 10 \text{ м}$	
$z = 100$	Число статистических испытаний в каждом значении азимута БПЛА		

Зависимость СКО погрешности определения координат точки правого нижнего угла тепловизионного изображения (9) от азимута БПЛА приведена на рис. 2.

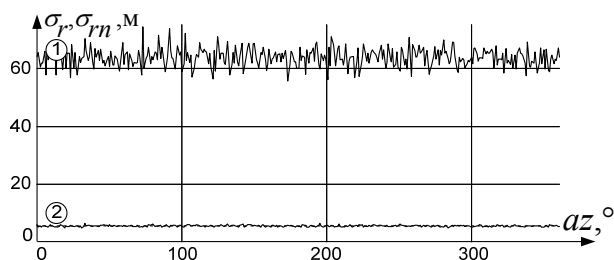


Рис. 2. Зависимость СКО погрешности определения координат точки правого нижнего угла тепловизионного изображения (9) от азимута БПЛА:
1 – до фильтрации; 2 – после фильтрации

Полученные результаты показывают, что погрешность определения пространственных координат заданной точки тепловизионного изображения без фильтрации, в соответствии с (9), составляет 64 м.

Таким образом, использование спроектированного и исследованного навигационного фильтра позволяет уменьшить погрешность определения пространственных координат заданной точки тепловизионного изображения до значения 5,5 м, что значительно улучшает эксплуатационные свойства комплекса [1; 2] и яв-

ляется достаточным для локализации повреждений и осуществления качественной диагностики. В настоящее время авторами осуществляется исследование реализаций навигационного фильтра применительно к моделям движения объекта с постоянной скоростью (модель второго порядка), а также с учетом наличия ускорений (модель третьего порядка). Данные модели позволят более адекватно описывать поведение БПЛА в полете и уточнить достижимые метрологические характеристики предложенного комплекса диагностики энергетических объектов.

Библиографические ссылки

1. Макаренко Г. К., Алешечкин А. М. Алгоритм координатной привязки тепловизионных снимков // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. тр. Красноярск : Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2012. С. 33–37.
2. Алешечкин А. М. Способ геодезической привязки аэрофотоснимков // Вестник СибГАУ. 2011. № 7 (40). С. 58–62.
3. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. М. : Эко-Трендз, 2000.
4. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М. : Радио и связь, 1993.

© Алешечкин А. М., Макаренко Г. К., 2013

**УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ СОВМЕЩЕННЫХ КАНАЛОВ
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ**

Н. М. Боев, Ю. А. Лебедев

Сибирский федеральный университет
Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28. E-mail: idi86@inbox.ru

Рассматриваются вопросы управления энергетической эффективностью отдельных каналов передачи данных при работе через единую систему связи. Одним из примеров использования подобных систем является передача телеметрической информации с борта летательного аппарата и передача данных полезной нагрузки через один связной модуль. Предлагается структура построения совмещенной системы связи, в которой имеется возможность управления распределением энергетической эффективности между отдельными каналами передачи данных как на этапе конструирования системы, так и в процессе работы системы связи.

Ключевые слова: цифровая связь, энергетическая эффективность, адаптивное изменение параметров системы связи, программно-определяемые системы связи.

ENERGY EFFICIENCY MANAGMENT OF COMMUNICATION CHANNELS

N. M. Boev, Yu. A. Lebedev

Siberian Federal University
28 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: idi86@inbox.ru

The article considers questions of energy efficiency management of communication channels operating in a single communication system. The authors propose data transfer method in wireless networks that can be used for distribution of energy efficiency between communication channels of one communication system. The structures of transmitter and receiver are described. The authors describe a communication system of unmanned aerial vehicle where there is necessity to transmit low-speed telemetry data and to transmit high-speed payload data to ground control unit. The information of low-speed data source is modulated by QAM4 and information of high-speed data source is modulated by QAM16. Synthesized constellation is obtained by summation of QAM4 and QAM16. By adjusting the amplitude of QAM4 we can distribute energy efficiency between communication channels. The proposed method can be generalized for multichannel communication systems. Adaptive distribution of energy efficiency between communication channels allows to improve communication systems energy and spectral efficiency.

Keywords: digital communications, energy efficiency, adaptive alteration of communicational system parameters, software-defined radio.

При передаче данных от нескольких источников через единую систему связи в некоторых случаях возникает необходимость в управлении энергетической эффективностью каждого канала передачи данных. Например, при передаче телеметрических данных с борта летательного аппарата (ЛА), как правило, необходимо обеспечить заданную на уровне $10^{-5} \dots 10^{-6}$ вероятность символьной ошибки при максимально возможной дальности работы системы связи, т. е. при минимально возможных отношениях сигнал/шум [1], в то время как к передаче данных полезной нагрузки (ПН) в режиме реального времени с борта ЛА предъявляются менее жесткие требования. Например, при передаче информации с датчиков различных диапазонов длин волн (видеокамер, инфракрасных датчиков и др.), требования к вероятности символьной ошибки могут быть на уровне $10^{-3} \dots 10^{-4}$. В то же время скорость передачи телеметрических данных обычно не превышает 100 кбит/с, тогда как скорость передачи

данных ПН существенно выше. Реализация независимых систем передачи данных для каждого канала не всегда оправдана в силу повышения стоимости связного оборудования, а также увеличения его массы и габаритов. Кроме того, в некоторых случаях имеется необходимость в передаче данных от большого числа независимых источников информации и реализация отдельных систем связи для каждого канала становится невозможной. Возникает проблема создания единой многоканальной системы связи с возможностью перераспределения энергетической эффективности между отдельными каналами связи.

Для решения поставленной проблемы может быть предложено несколько подходов. Первый подход основан на создании суммирующего канального кодера с несколькими входами данных и одним выходом, при этом для каждого информационного входа задается разная степень кодирования, что и создает возможность перераспределения энергетического ресурса

са канала связи. Второй подход предлагается использовать модифицированные сигнальные созвездия системы связи, что также позволяет перераспределять энергетический ресурс. В основе третьего подхода лежит совместное использование первого и второго подходов. В данной статье авторами рассматривается второй подход.

Для примера рассмотрим случай передачи данных через единую систему связи от двух источников информации: высокоскоростного и низкоскоростного. Для передачи данных низкоскоростного источника предлагается использование созвездия квадратурной амплитудной манипуляции второго порядка – КАМ4. В дальнейшем данное созвездие будем называть опорным. Для передачи данных высокоскоростного источника информации требуется использование созвездий квадратурной амплитудной манипуляции более высоких порядков, например КАМ16 (рис. 1).

Данные от источника низкоскоростной информации поступают на модулятор опорного созвездия КАМ4, данные от источника высокоскоростной информации поступают на второй модулятор, позиционность созвездия которого определяется исходя из необходимого соотношения скоростей передачи данных в каналах. Таким образом, при одинаковой символьной скорости передачи данных (бод) эффективная скорость (бит/с) будет зависеть от позиционности выбранного сигнального созвездия (см. таблицу). При необходимости спектр сигнала низкоскоростного источника информации может быть расширен, например кодами Баркера. Это позволит увеличить соотношение эффективных скоростей передачи информации на порядок.

Для передачи информации двух каналов данных через единую систему связи к сигналу опорного модулятора прибавляется сигнал второго модулятора. В результате сложения образуется новое созвездие порядка $m = n + l$, где n – порядок созвездия передачи данных высокоскоростного источника информации, $l = 2$ – порядок опорного созвездия. Точки опорного созвездия КАМ4 имеют координаты на комплексной плоскости $\pm K \pm iK$, где K – параметр, при помощи которого осуществляется перераспреде-

ление энергетического ресурса между каналами связи (на рис. 1 показано опорное созвездие КАМ4 при $K = 4$). Вид синтезированного созвездия зависит от параметра K (рис. 2). Известно, что энергетическая эффективность цифровых видов квадратурной амплитудной манипуляции определяется наименьшим евклидовым расстоянием между двумя точками нормированного созвездия [2]. С увеличением параметра K расстояние между точками опорного созвездия увеличивается, энергетическая эффективность растет. В то же время расстояние между точками созвездия передачи высокоскоростной информации уменьшается, что приводит к ухудшению энергетической эффективности.

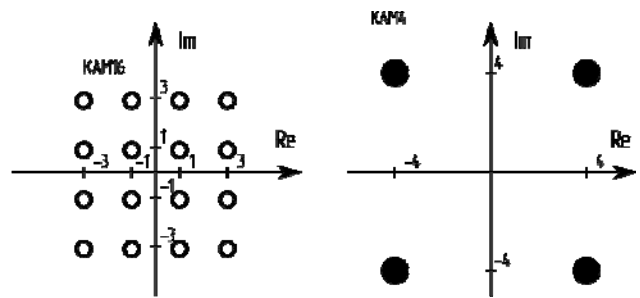


Рис. 1. Созвездие передачи данных высокоскоростного источника информации КАМ16 и опорное созвездие передачи данных низкоскоростного источника информации КАМ4

В предельном случае, когда $K \rightarrow \infty$, энергетическая эффективность опорного созвездия стремится к энергетической эффективности классического случая манипуляции КАМ4, а передача данных по высокоскоростному каналу становится невозможной. Параметр K может быть задан на этапе проектирования многоканальной системы передачи данных или может изменяться в процессе работы адаптивной программно-определяемой системы связи.

На рис. 3 показана структурная схема передающей части цифровой системы связи с управлением энергетической эффективностью каналов передачи информации.

Соотношение эффективных скоростей передачи информации

Опорное созвездие передачи данных низкоскоростного источника информации	Порядок опорного созвездия передачи данных низкоскоростного источника информации	Созвездие передачи данных высокоскоростного источника информации	Порядок созвездия передачи данных высокоскоростной информации	Порядок сформированного созвездия	Соотношение эффективных скоростей передачи информации
КАМ4	2	КАМ4	2	4	1
		КАМ8	3	5	1,5
		КАМ16	4	6	2
		КАМ32	5	7	2,5
		КАМ64	6	8	3
		КАМ128	7	9	3,5
		КАМ256	8	10	4

Данные от низкоскоростного источника информации поступают на модулятор опорного созвездия КАМ4, при помощи которого также осуществляется управление распределением энергетической эффективности между каналами. Данные от высокоскоростного источника информации поступают на второй модулятор (модулятор КАМ16). Комплексные сигналы с выходов модуляторов суммируются и нормируются для дальнейшей цифровой обработки сигнала. Ограничение спектра сигнала осуществляется при помощи формирующих фильтров, после чего сигнал переносится

квадратурным преобразователем частоты с нулевой промежуточной частоты на несущую частоту.

Структурная схема приемной части системы связи показана на рис. 4. Входной сигнал переносится на нулевую промежуточную частоту при помощи квадратурного преобразователя частоты, затем осуществляется согласованная фильтрация (в целях упрощения структурной схемы элементы синхронизации приемной части системы связи по несущему колебанию и символьной частоте, а также блок решения фазовой неоднозначности на рис. 4 не показаны).

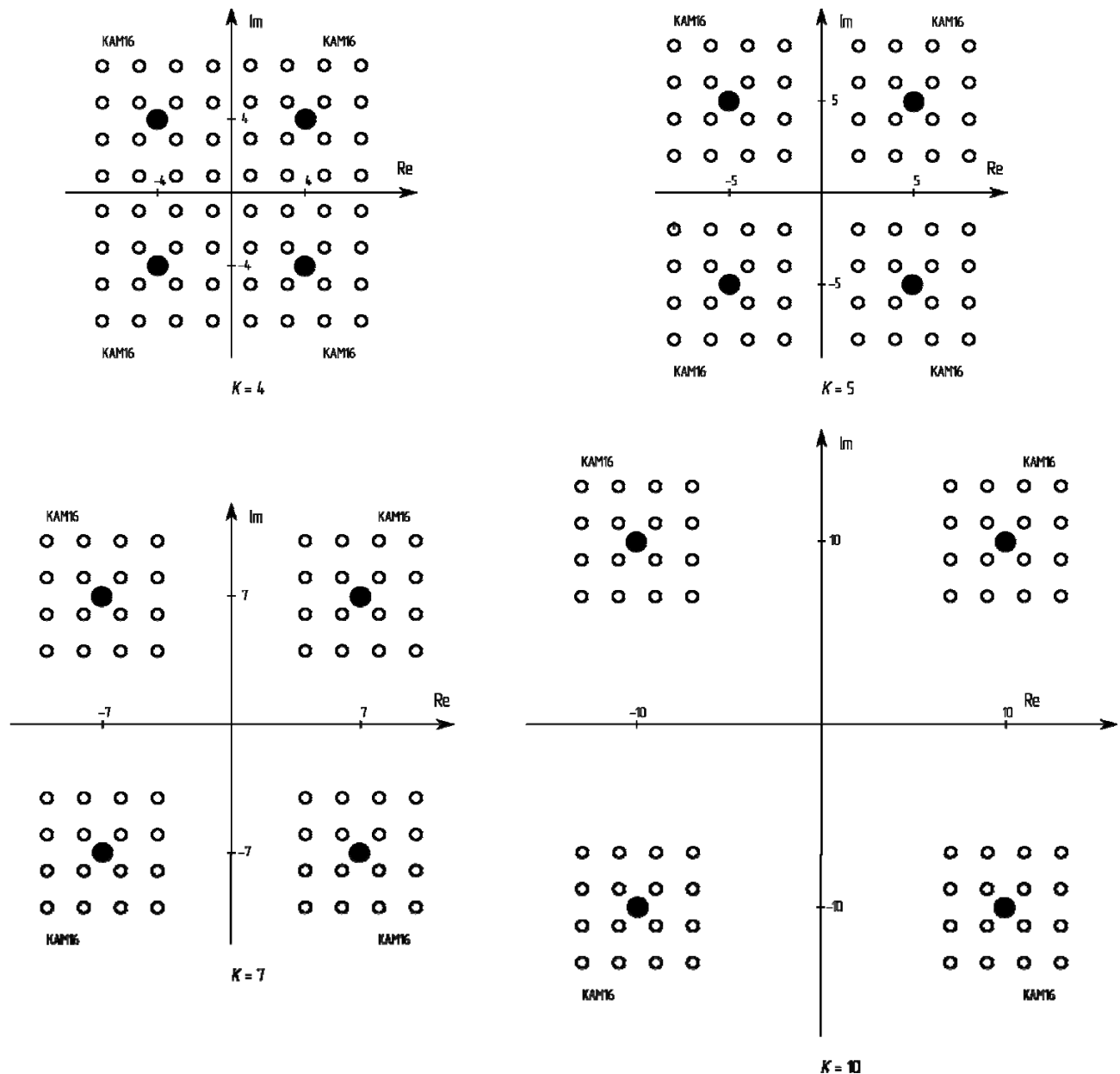


Рис. 2. Вид синтезированного созвездия при различных значениях параметра K :
 $K = 4, 5, 7, 10$

После фильтрации составляющие комплексного сигнала поступают на демодулятор КАМ4, реализуемый в виде двух компараторов и таблицы соответствий (истинности). С выхода демодулятора КАМ4 данные поступают получателю низкоскоростной ин-

формации и на вход регенератора опорного созвездия КАМ4. Регенерация опорного созвездия необходима для осуществления демодуляции сигнала высокоскоростного канала связи.

Управление энергетической
эффективностью каналов передачи данных

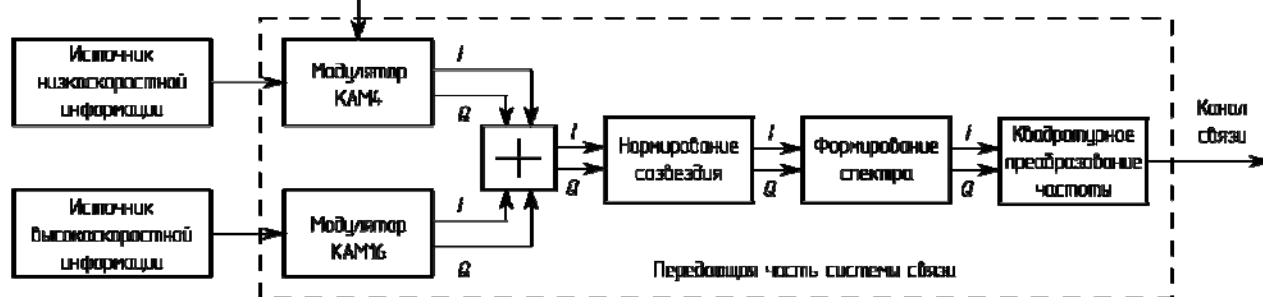


Рис. 3. Структурная схема передающей части системы связи

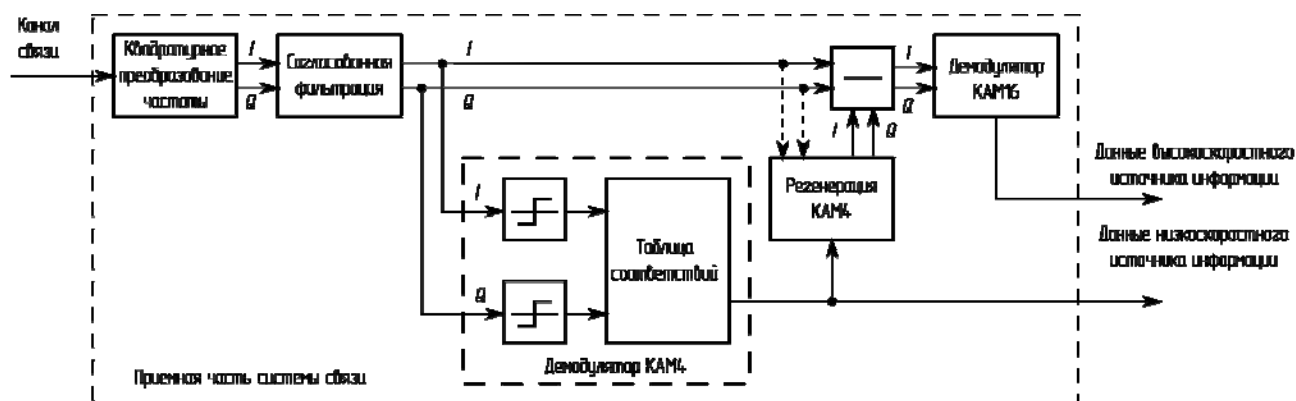


Рис. 4. Структурная схема приемной части системы связи

В случае если параметр K не изменяется в процессе работы или заранее известен, регенерация созвездия осуществляется на основе данных демодулятора КАМ4. В случае если параметр K адаптивно изменяется в процессе работы и передача его значения по имеющимся каналам связи невозможна, необходимо осуществлять оценку значения этого параметра, используя комплексный сигнал с выхода согласованного фильтра. Разность между принимаемым сигналом и регенерированным сигналом КАМ4 поступает на де-

модулятор сигнала высокоскоростной передачи информации КАМ16, данные с которого передаются получателю.

Модели передатчика и приемника системы связи, а также модель канала связи были реализованы в программном пакете графического блочного имитационного моделирования Simulink MATLAB. На рис. 5 показаны зависимости вероятности символьной ошибки от отношения сигнал/шум в канале передачи данных системы связи для различных значений параметра K .

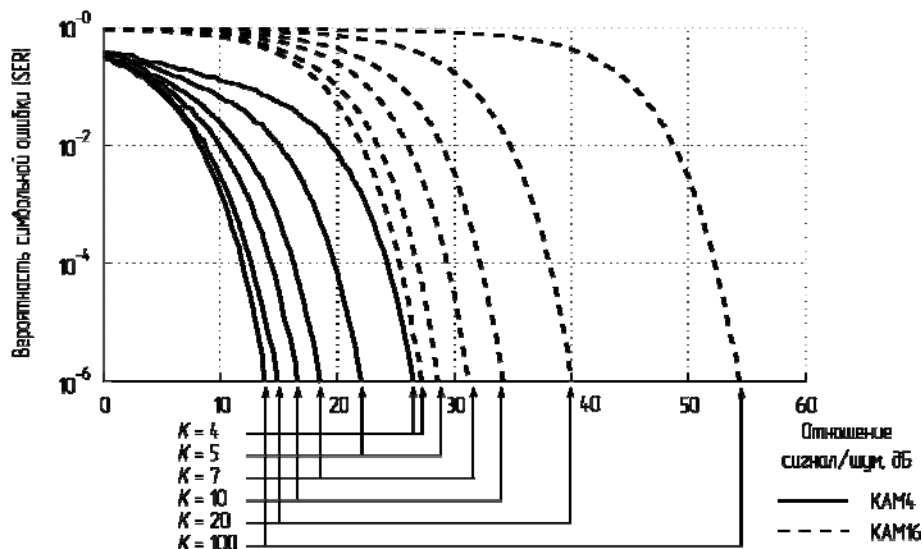


Рис. 5. Результаты моделирования системы связи в Simulink при различных значениях параметра K

Как видно из рис. 5, при параметре $K = 4$ зависимости для каналов связи сходятся при низких вероятностях символьной ошибки и соответствуют зависимости для классического варианта КАМ64. Увеличение параметра K до 5 приводит к резкому перераспределению энергетической эффективности между каналами связи. При значениях параметра K более 20 график зависимости энергетической эффективности для низкоскоростного источника информации изменяется мало и приближается к зависимости для классического варианта КАМ4. При этом график энергетической зависимости для высокоскоростного канала значительно смещается вправо и демодуляция сигнала становится невозможной.

Таким образом, предложенный метод передачи информации от нескольких источников по единому широкополосному общему каналу связи позволяет

эффективно перераспределять энергетический ресурс системы связи между каналами. Адаптивное управление амплитудой опорного созвездия позволяет повысить эффективность системы связи при изменяющихся условиях распространения сигнала в канале связи.

Результаты получены при поддержке Министерства образования Российской Федерации.

Библиографические ссылки

1. Боев Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолнии связи с беспилотными летательными аппаратами. Вестник СибГАУ. 2012. № 2 (42). С. 86–91.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М. : Вильямс, 2003.

© Боев Н. М., Лебедев Ю. А., 2013

УДК 536.24

РАСЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ЧИСЕЛ В ЗАДАЧЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ СТЕНКУ ПРИ СМЕШАННЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Ю. В. Видин, Д. И. Иванов

Сибирский федеральный университет
660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: idi86@inbox.ru

С использованием аналитических зависимостей разработан аналитический приближенный метод расчета собственных чисел в задаче нестационарной теплопередачи через цилиндрическую стенку при смешанных граничных условиях на внутренней и внешней поверхностях полого цилиндрического тела. Показано, что высокая точность расчета может быть достигнута с помощью доступных математических преобразований, т. е. без обращения к сложным специальным функциям Бесселя.

Ключевые слова: теплопередача, нестационарный процесс, собственные числа, цилиндрическая стенка, температурное поле, аналитический метод.

CALCULATION OF EIGENVALUES IN THE PROBLEM OF UNSTEADY HEAT TRANSFER THROUGH A CYLINDRICAL WALL WITH MIXED BOUNDARY CONDITIONS

Yu. V. Vidin, D. I. Ivanov

Siberian Federal University
26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: idi86@inbox.ru

With the use of analytical dependencies, the authors developed an analytical approximate method for calculation of eigenvalues in the problem of non-stationary heat transfer through a cylindrical wall with mixed boundary conditions on the inner and outer surfaces of the hollow cylindrical body. The authors prove that the high accuracy of the calculation can be achieved with the use of the available mathematical transformations, in other words, without resort to complex special Bessel functions.

Keywords: heat transfer, non-stationary process, eigenvalues, cylindrical wall, temperature field, analytical method.

Известно, что аналитические методы дают полную, всеобъемлющую картину моделируемого процесса или явления в отличие от численных методов, которые требуют огромной вариативной проработки искомой задачи каждый раз при новом наборе исходных данных.

В этом плане следует отметить, что получение точных аналитических решений линейных и нелинейных задач теплопроводности для однослойных и многослойных конструкций с переменными в пределах каждого слоя физическими свойствами среды, а также с переменными по координатам и во времени граничными

ми условиями представляет серьезные математические трудности. Аналитические решения получены лишь для незначительного круга отдельных частных задач, к тому же при весьма существенных допущениях. В связи с этим актуальность разработки новых эффективных аналитических (приближенных аналитических) методов решения краевых задач для моделирования процессов теплопереноса не вызывает сомнений.

Аналитические решения задач нестационарной теплопроводности обычно представляют собой бесконечные функциональные ряды, члены которых зависят как от пространственных координат и времени, так и от корней соответствующих характеристических уравнений. При проведении практических расчетов температурных полей, как правило, достаточно знать несколько первых собственных значений этих уравнений, вид которых определяется типом граничных условий на поверхностях тела.

Для облегчения использования теоретических решений в инженерной практике принято дополнять их подробными таблицами собственных чисел и начальных тепловых амплитуд.

Наряду с табличными представлениями корней характеристических уравнений разрабатываются и аналитические зависимости для их нахождения.

Аналитический расчет процесса нестационарной теплопередачи через цилиндрическую стенку связан с задачей нахождения собственных чисел на основе сложного характеристического уравнения [1]:

$$\frac{Bi_1 J_0(\mu) + \mu J_1(\mu)}{Bi_1 Y_0(\mu) + \mu Y_1(\mu)} = \frac{Bi_2 J_0(\psi^* \mu) - \mu J_1(\psi^* \mu)}{Bi_2 Y_0(\psi^* \mu) - \mu Y_1(\psi^* \mu)}, \quad (1)$$

где $Bi_1 = \alpha_1 R_1 / \lambda$, $Bi_2 = \alpha_2 R_2 / \lambda$ – безразмерные числа подобия (числа Био); $\psi = r / R_1$, – безразмерная радиальная координата ($1 \leq \psi \leq \psi^*$); $\psi^* = R_2 / R_1$.

В связи с большим числом параметров в зависимости (1) составить расширенные таблицы корней весьма затруднительно. Поэтому первоначально имеет смысл установить возможные пределы для искомых чисел μ_n . С этой целью рассмотрим частный случай уравнения (1), а именно, примем, что $Bi_1 = \infty$, а $Bi_2 = 0$, т. е. на внутренней поверхности полого цилиндрического тела действуют граничные условия первого рода, а на внешней поверхности – граничные условия второго рода. Тогда формула (1) вырождается в соотношение

$$\frac{J_0(\mu)}{Y_0(\mu)} = \frac{J_1(\psi^* \mu)}{Y_1(\psi^* \mu)}. \quad (2)$$

Если предположить, что искомые корни $\mu_n \geq 3$, то допустимо аппроксимировать функции Бесселя $J_0(\mu)$, $Y_0(\mu)$, $J_1(\psi^* \mu)$ и $Y_1(\psi^* \mu)$ следующими приближениями [2]:

$$J_0(\mu) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} f_0 \cos \theta_0, \quad (3)$$

$$Y_0(\mu) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} f_0 \sin \theta_0, \quad (4)$$

где θ_0 описывается выражением

$$\begin{aligned} \theta_0 = & \mu - 0,785\,398\,16 - 0,041\,663\,92 \left(\frac{3}{\mu} \right) - \\ & - 0,000\,039\,54 \left(\frac{3}{\mu} \right)^2 + 0,002\,625\,73 \left(\frac{3}{\mu} \right)^3 - \\ & - 0,000\,541\,25 \left(\frac{3}{\mu} \right)^4 - 0,000\,293\,33 \left(\frac{3}{\mu} \right)^5 + \\ & + 0,000\,135\,8 \left(\frac{3}{\mu} \right)^6 + \varepsilon, \end{aligned} \quad (5)$$

здесь $|\varepsilon| < 7 \cdot 10^{-8}$,

$$J_1(\psi^* \mu) = \frac{1}{\sqrt{\psi^* \mu}} f_1^* \cos \theta_1^*, \quad (6)$$

$$Y_1(\psi^* \mu) = \frac{1}{\sqrt{\psi^* \mu}} f_1^* \sin \theta_1^*, \quad (7)$$

где θ_1^* описывается выражением

$$\begin{aligned} \theta_1^* = & \mu \psi^* - 2,356\,194\,4 + 0,124\,996\,12 \left(\frac{3}{\mu \psi^*} \right) + \\ & + 0,000\,056\,50 \left(\frac{3}{\mu \psi^*} \right)^2 - 0,006\,378\,79 \left(\frac{3}{\mu \psi^*} \right)^3 + \\ & + 0,007\,434\,8 \left(\frac{3}{\mu \psi^*} \right)^4 + 0,000\,798\,24 \left(\frac{3}{\mu \psi^*} \right)^5 - \\ & - 0,000\,291\,66 \left(\frac{3}{\mu \psi^*} \right)^6 + \varepsilon, \end{aligned} \quad (8)$$

здесь $|\varepsilon| < 9 \cdot 10^{-8}$,

С учетом (3), (4), (6) и (7) уравнение (2) запишется в виде

$$\frac{\cos \theta_0}{\sin \theta_0} = \frac{\cos \theta_1^*}{\sin \theta_1^*}. \quad (9)$$

Согласно [3] зависимость (9) эквивалентна формуле

$$\sin(\theta_1^* - \theta_0) = 0. \quad (10)$$

Отсюда вытекает, что

$$\theta_1^* - \theta_0 = (n-1)\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Подставив в (11) вместо θ_0 и θ_1^* соотношения (5) и (8) и ограничиваясь в них первыми тремя слагаемыми, составим квадратное алгебраическое уравнение для вычисления μ_n :

$$\begin{aligned} \mu_n^2 - \frac{1,570\,796\,33 + (n-1)\pi}{\psi^* - 1} \mu_n + \\ + \frac{3}{\psi^*} \frac{(0,124\,996\,12 + 0,041\,663\,92 \psi^*)}{(\psi^* - 1)} = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

Решая это уравнение, найдем искомые корни

$$\mu_n = \frac{1,570\,796\,33 + (n-1)\pi}{2(\psi^* - 1)} + \sqrt{\frac{(1,570\,796\,33 - (n-1)\pi)^2}{4(\psi^* - 1)^2} - \frac{3(0,124\,996\,12 + 0,041\,663\,92\psi^*)}{\psi^*(\psi^* - 1)}} \quad (13)$$

В табл. 1 приведены значения первых трех собственных чисел μ_n для $\psi^* = 5/4$; $\psi^* = 5/3$; $\psi^* = 5/2$, рассчитанные по предложенной методике и приведенные в [2] для случая $Bi_1 = \infty$; $Bi_2 = 0$.

Аналогичным образом ведется расчет для уравнения (1), когда $Bi_1 = 0$, а $Bi_2 = \infty$, т. е. на внутренней поверхности полого цилиндрического тела действуют граничные условия второго рода, а на внешней поверхности – граничные условия первого рода. Тогда формула (1) вырождается в соотношение

$$\frac{J_1(\mu)}{Y_1(\mu)} = \frac{J_0(\psi^*\mu)}{Y_0(\psi^*\mu)}, \quad (14)$$

Квадратное алгебраическое уравнение для вычисления μ_n в этом случае записывается следующим образом

$$\mu_n^2 + \frac{1,570\,796\,33 - n\pi}{\psi^* - 1}\mu_n - \frac{3(0,041\,663\,92 + 0,124\,996\,12\psi^*)}{\psi^*(\psi^* - 1)} = 0. \quad (15)$$

Решая это уравнение, найдем искомые корни

$$\mu_n = \frac{-1,570\,796\,33 + n\pi}{2(\psi^* - 1)} + \sqrt{\frac{(1,570\,796\,33 - n\pi)^2}{4(\psi^* - 1)^2} + \frac{3(0,124\,996\,12 + 0,041\,663\,92\psi^*)}{\psi^*(\psi^* - 1)}} \quad (16)$$

В табл. 2 приведены значения первых трех собственных чисел μ_n для $\psi^* = 5/4$; $\psi^* = 5/3$; $\psi^* = 5/2$, рассчитанные по предложенной методике и приведенные в [2] для случая $Bi_1 = 0$, $Bi_2 = \infty$.

Таблица 1

Корни характеристического уравнения (2) μ_n ($Bi_1 = \infty$; $Bi_2 = 0$)

μ_1		μ_2		μ_3	
Расчет числовым методом	Расчет по формуле (13)	Расчет числовым методом	Расчет по формуле (13)	Расчет числовым методом	Расчет по формуле (13)
$\psi^* = 5/4$					
6,002 58	5,999 86	18,759 02	18,758 94	31,361 74	31,361 72
$\psi^* = 5/3$					
2,120 33	2,107 04	6,993 94	6,993 52	11,736 33	11,736 24
$\psi^* = 5/2$					
0,866 06	0,824 98	3,083 54	3,082 11	5,201 07	5,200 74

Таблица 2

Корни характеристического уравнения (14) μ_n ($Bi_1 = 0$; $Bi_2 = \infty$)

μ_1		μ_2		μ_3	
Расчет по методике [2]	Расчет по формуле (16)	Расчет по методике [2]	Расчет по формуле (16)	Расчет по методике [2]	Расчет по формуле (16)
$\psi^* = 5/4$					
6,569 73	6,572 27	18,949 71	18,949 82	31,476 26	31,361 72
$\psi^* = 5/3$					
2,603 28	2,614 37	7,162 13	7,162 62	11,837 83	11,837 99
$\psi^* = 5/2$					
1,242 66	1,270 24	3,226 55	3,229 33	5,288 85	5,289 55

Из табл. 1, 2 видно, что расхождение корней, рассчитанных по предложенному методу и по методике [2] и численному методу, незначительно даже для собственных чисел μ , близких к 3. При числах $\mu < 3$ точность предложенного метода также достаточно высока: расхождение значений собственных чисел для цилиндрических стенок малой толщины не превышает 1 %, что в свою очередь требует дополнительной проверки при проведении инженерных расчетов.

Указанный выше диапазон корней $\mu_n \geq 3$ в частном случае может быть расширен в меньшую сторону для чисел μ близких к 3, т. е. расчет может быть проведен и для более массивных стенок.

Таким образом, произведен расчет собственных чисел в задаче нестационарной теплопередачи через цилиндрическую стенку при различных граничных условиях на внешней и внутренней поверхностях полого цилиндрического тела. Точность расчета повы-

шается с уменьшением толщины стенки (параметра ψ^*) и увеличением порядкового номера n .

Определены предельные значения собственных чисел для смешанных граничных условий. Процесс нахождения собственных чисел упрощается за счет:

- уменьшения числа параметров в уравнении;
- использования вместо сложных Бесселевых функций известного приближения [2].

Библиографические ссылки

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высш. шк., 1967.
2. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М. : Наука, 1979.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1965.

© Видин Ю. В., Иванов Д. И., 2013

УДК 621.314

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПРИ НУЛЕВЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТОКА*

Н. Н. Горяшин, А. Н. Зорин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: gorkolya@mail.ru

Рассматриваются способы управления повышающим преобразователем напряжения (ПН) с переключением ключевых элементов при нулевых значениях тока. Предложена математическая модель данного ПН, на основании которой показано, что по сравнению с традиционным импульсным ПН исследуемый тип преобразователя обладает большим коэффициентом демпфирования как замкнутая система регулирования.

Ключевые слова: повышающий преобразователь напряжения, резонансный преобразователь.

RESEARCH OF BOOST CONVERTER WITH SWITCH AT ZERO CURRENT

N. N. Goryashin, A. N. Zorin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: gorkolya@mail.ru

Methods of zero-current-switch boost converter control are analyzed in this article. Mathematical model of such converter is proposed. The authors show that the proposed converter under closed loop control has higher damping factor as compared with conventional step-up boost converter under the same conditions.

Keywords: step-up boost converter, resonant converter.

Необходимость увеличения мощности оборудования, которое входит в космические спутниковые системы, ставит задачу увеличения удельных энергетических характеристик систем электроснабжения космических аппаратов (СЭС КА). В качестве вторичных источников электропитания СЭС КА используются импульсные преобразователи напряжения (ПН). Для увеличения удельной мощности ПН необходимо увеличивать частоту преобразования, что в классических схемах ПН приводит к увеличению мощности потерь на переключение ключевых элементов (КЭ). К настоящему времени опубликовано много работ, где рассматриваются различные типы ПН с резонансным контуром (РК) в цепи силовых ключей, которые можно разделить на два больших класса: ПН, использую-

щие режим переключения КЭ при нулевых значениях тока (ПНТ-преобразователи), и ПН, использующие режим переключения КЭ при нулевых значениях напряжения (ПНН-преобразователи) [1; 2]. Это два основных режима работы КЭ с использованием явления резонанса.

Можно выделить следующие типы высокочастотных ПН с использованием РК: резонансные, квазирезонансные, с резонансным переключением. Квазирезонансные ПН (преобразователи с дозированной передачей энергии), как и традиционные преобразователи с широтно-импульсной модуляцией, характеризуются однонаправленной передачей энергии в нагрузку. Методика переключения при нулевом напряжении и при нулевом токе применима ко всем основным

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.740.11.1124 от 30 мая 2011 г. «Методы повышения эффективности энергопреобразующих устройств энергосистем космических аппаратов».

способам импульсного преобразования электрической энергии: понижающим, повышающим и инвертирующим преобразователям, а также прямоходовым, обратногоходовым, полумостовым и мостовым инверторам [3].

Таким образом, возможным решением обозначенной проблемы является применение методики переключения при нулевом токе, особенностью которой является снижение потерь мощности при переключении и, как следствие, увеличение КПД, а также возможность увеличения частоты преобразования, что в свою очередь увеличивает удельные энергетические характеристики. Так как через ключи протекает ток резонансного контура, имеющий синусоидальный характер, то улучшается электромагнитная совместимость (ЭМС) источника питания с приемопередающим оборудованием. Однако резонансный контур оказывает влияние на динамические характеристики источника. Целью данной работы было исследование этого влияния.

Примером ПНТ-преобразователя может служить повышающий преобразователь напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и переключением при нулевом токе, предложенный в [4]. Упрощенная электрическая схема такого ПН представлена на рис. 1, а диаграммы работы – на рис. 2.

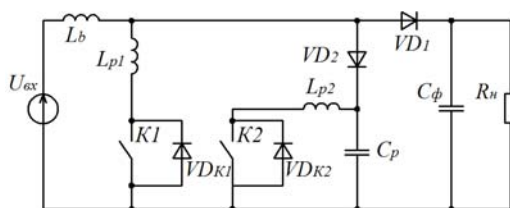


Рис. 1. Схема повышающего ПНТ-преобразователя напряжения с ШИМ

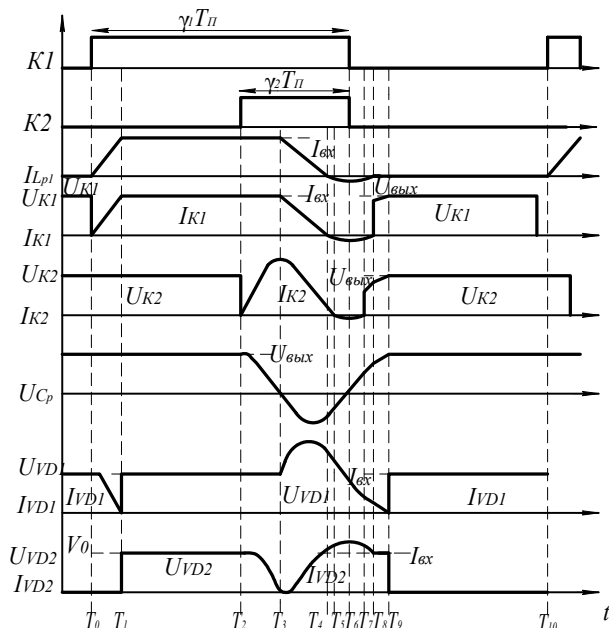


Рис. 2. Временные диаграммы режимов работы силовой части

Один цикл работы данного преобразователя можно разбить на девять этапов.

Этап 1 (T_0 – T_1). До момента T_0 входной ток $I_{вх}$ протекает через выпрямительный диод $VD1$. В момент времени T_0 включается главный ключ $K1$ и выходное напряжение прикладывается к резонансной индуктивности L_{p1} . Ток через $K1$ и L_{p1} линейно увеличивается до момента, когда он достигает значения $I_{вх}$. Это момент времени T_1 .

Этап 2 (T_1 – T_2). Входной ток протекает через $K1$ и L_{p1} . В этом режиме выходной диод остается запертым и напряжение на конденсаторе фиксирует выходное напряжение.

Этап 3 (T_2 – T_3). В момент времени T_2 включается вспомогательный ключ $K2$ и C_p разряжается через него. Когда напряжение на конденсаторе достигает нуля, в момент времени T_3 включается диод $VD2$ и режим заканчивается.

Этап 4 (T_3 – T_4). В момент времени T_3 диод $VD2$ начинает проводить, а конденсатор C_p заряжается отрицательным напряжением. Токи, протекающие через ключи, уменьшаются, и этот режим закончится, когда ток через главный ключ достигнет нуля. Так как диод $VD2$ проводит ток, то напряжение на диоде $VD1$ увеличивается, а напряжение на конденсаторе уменьшается.

Этап 5 (T_4 – T_5). В момент времени T_4 ток через $K1$ достигает нуля и встречно-параллельный диод VD_{K1} начинает проводить.

Этап 6 (T_5 – T_7). В момент времени T_5 ток через $K2$ достигает нуля и встречно-параллельный диод VD_{K2} начинает проводить. В момент времени T_6 , когда ток через $K1$ и $K2$ достигает отрицательного пика, сигналы управления затворами $K1$ и $K2$ становятся запирающими и оба ключа выключаются при нулевом токе.

Этап 7 (T_7 – T_8). Конденсатор C_p заряжается в процессе резонанса с L_{p1} . Этот режим закончится, когда ток через встречно-параллельный диод VD_{K1} достигнет нуля.

Этап 8 (T_8 – T_9). Входной ток протекает через $VD2$, заряжая C_p . Напряжение на конденсаторе линейно возрастает, пока в момент времени T_9 не достигнет $U_{вых}$.

Этап 9 (T_9 – T_{10}). Когда U_{Cp} достигнет $U_{вых}$, $VD2$ закроется и $VD1$ начнет проводить. Так как напряжение C_p фиксируется на $U_{вых}$, то $VD2$ выключается при нулевом напряжении. В течение режима $I_{вх}$ протекает на выход через $VD1$.

Далее для анализа динамических характеристик системы необходима динамическая модель системы. Воспользовавшись методикой, описанной в [5], получим передаточную функцию ПН. Для этого составим уравнения для элементов вектора состояния ($U_{сф} = U_{вых}$, $I_{Lb} = I_{вх}$):

$$\dot{U}_{вых} = \begin{cases} \frac{-U_{вых}}{C_{\phi} R_n} + \frac{I_{Lb}}{C_{\phi}} - \frac{I_{Lp1}}{C_{\phi}} & t \in [0, T_1), \\ \frac{-U_{вых}}{C_{\phi} R_n} & t \in [T_1, T_9), \\ \frac{-U_{вых}}{C_{\phi} R_n} + \frac{I_{Lb}}{C_{\phi}} & t \in [T_9, T_{10}). \end{cases}$$

$$I_{Lb} = \begin{cases} \frac{(U_{Bx} - U_{BbX})}{L_b} & t \in [0, T_1), \\ \frac{U_{Bx}}{L_b} & t \in [T_1, T_3), \\ \frac{(U_{Bx} - U_{Cp})}{L_b} & t \in [T_3, T_9), \\ \frac{(U_{Bx} - U_{BbX})}{L_b} & t \in [T_9, T_{II}). \end{cases} \quad (1)$$

Из полученных уравнений составим системы уравнений для каждого временного интервала:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{U}_{BbX} \\ \dot{I}_{Lb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_\Phi R_H} & \frac{1}{C_\Phi} \\ \frac{-1}{L_b} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{BbX} \\ I_{Lb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{C_\Phi} & 0 \\ \frac{1}{L_b} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{Bx} \\ I_{Lp1} \\ U_{Cp} \end{bmatrix}, \\ U_{BbX} = [1 \ 0] \begin{bmatrix} U_{BbX} \\ I_{Lb} \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{U}_{BbX} \\ \dot{I}_{Lb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_\Phi R_H} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{BbX} \\ I_{Lb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_b} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{Bx} \\ I_{Lp1} \\ U_{Cp} \end{bmatrix}, \\ U_{BbX} = [1 \ 0] \begin{bmatrix} U_{BbX} \\ I_{Lb} \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{U}_{BbX} \\ \dot{I}_{Lb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_\Phi R_H} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{BbX} \\ I_{Lb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_b} & 0 & \frac{-1}{L_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{Bx} \\ I_{Lp1} \\ U_{Cp} \end{bmatrix}, \\ U_{BbX} = [1 \ 0] \begin{bmatrix} U_{BbX} \\ I_{Lb} \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{U}_{BbX} \\ \dot{I}_{Lb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_\Phi R_H} & \frac{1}{C_\Phi} \\ \frac{-1}{L_b} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{BbX} \\ I_{Lb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_b} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{Bx} \\ I_{Lp1} \\ U_{Cp} \end{bmatrix}, \\ U_{BbX} = [1 \ 0] \begin{bmatrix} U_{BbX} \\ I_{Lb} \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (5)$$

Далее будем использовать обозначение матриц пространства состояния.

Для учета времени работы на каждом этапе используем весовые коэффициенты:

$$\begin{aligned} \frac{T_1}{T_{II}} &= k_1, \quad \frac{T_3 - T_1}{T_{II}} = \gamma' - k_2 - k_1, \\ \frac{T_9 - T_3}{T_{II}} &= k_3 + k_2, \quad \frac{T_{II} - T_9}{T_{II}} = 1 - \gamma' - k_3. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения пространства состояний для всего периода преобразования имеют вид

$$\begin{cases} \bar{x} = \begin{bmatrix} A_1 k_1 + A_2 (\gamma' - k_2 - k_1) + A_3 (k_3 + k_2) + \\ + A_4 (1 - \gamma' - k_3) \end{bmatrix} \bar{x} + \\ + \begin{bmatrix} B_1 k_1 + B_2 (\gamma' k_2 - k_1) + B_3 (k_3 + k_2) + \\ + B_4 (1 - \gamma - k_3) \end{bmatrix} \bar{u}, \\ \bar{y} = \begin{bmatrix} C_1 k_1 + C_2 (\gamma - k_2 - k_1) + C_3 (k_3 + k_2) + \\ + C_4 (1 - \gamma' - k_3) \end{bmatrix} \bar{x} + \\ + \begin{bmatrix} D_1 k_1 + D_2 (\gamma' - k_2 - k_1) + D_3 (k_3 + k_2) + \\ + D_4 (1 - \gamma' - k_3) \end{bmatrix} \bar{u}. \end{cases} \quad (7)$$

Заменяем каждую переменную суммой постоянной части и малых возмущений, составляющими второго порядка пренебрегаем:

$$\begin{cases} \bar{x} = \begin{bmatrix} A_1 k_1 + A_2 (\gamma - k_2 - k_1) + A_3 (k_3 + k_2) + \\ + A_4 (1 - \gamma - k_3) \end{bmatrix} \bar{x} + \\ + \begin{bmatrix} B_1 k_1 + B_2 (\gamma - k_2 - k_1) + B_3 (k_3 + k_2) + \\ + B_4 (1 - \gamma - k_3) \end{bmatrix} \bar{u} + \\ + [(A_2 - A_4) \bar{x} + (B_2 - B_4) \bar{u}] \gamma = \\ = M_1 \bar{x} + M_2 \bar{u} + M_3 \gamma, \\ \bar{y} = \begin{bmatrix} C_1 k_1 + C_2 (\gamma - k_2 - k_1) + C_3 (k_3 + k_2) + \\ + C_4 (1 - \gamma - k_3) \end{bmatrix} \bar{x} + \\ + \begin{bmatrix} D_1 k_1 + D_2 (\gamma - k_2 - k_1) + D_3 (k_3 + k_2) + \\ + D_4 (1 - \gamma - k_3) \end{bmatrix} \bar{u} + \\ + [(C_2 - C_4) \bar{x} + (D_2 - D_4) \bar{u}] \gamma = \\ = M_4 \bar{x} + M_5 \bar{u} + M_6 \gamma. \end{cases} \quad (8)$$

Применим преобразование Лапласа к системе уравнений:

$$\begin{cases} s\bar{x} = M_1 \bar{x} + M_2 \bar{u} + M_3 \gamma, \\ \bar{y} = M_4 \bar{x} + M_5 \bar{u} + M_6 \gamma. \end{cases} \quad (9)$$

Решим систему уравнений относительно $\bar{y}$:

$$\bar{y} = M_4 [sE - M_1]^{-1} [M_2 \bar{u} + M_3 \gamma] + M_5 \bar{u} + M_6 \gamma. \quad (10)$$

Из этого выражения можно получить передаточную функцию (ПФ):

$$W(s) = \frac{\bar{y}}{\gamma} \Big|_{\bar{u}=0} = M_4 [sE - M_1]^{-1} M_3 + M_6. \quad (11)$$

Найдем значение матриц, используемых в полученном выражении:

$$M_1 = \begin{bmatrix} -1/C_\Phi R_H & k - \gamma/C_\Phi \\ -(k - \gamma)/L_b & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} -I_{Lb}/C_\Phi \\ U_{\text{ВЫХ}}/L_b \end{bmatrix} M_4 = [1 \ 0], \quad M_6 = [0], \quad (12)$$

$$k = 1 - k_3 + k_1 = 1 -$$

$$\left(\frac{\arccos(\alpha)}{\omega_{\text{ЭКВ}}} + \frac{C_p U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} \left[1 - \sqrt{1 - \beta} - \frac{Z_2}{L_{p1} + L_{p2}} (1 + \alpha) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\frac{\arccos(\alpha) - \arccos(\beta)}{\omega_{\text{ЭКВ}}} \right) \right] \right) - \frac{L_{p1} I_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} \quad \text{где} \quad (13)$$

Подставив (12) в (11), получим ПФ:

$$\left. \frac{\bar{y}}{\gamma} \right|_{\bar{u}=0} = [1 \ 0] \begin{bmatrix} s & \frac{k - \gamma}{C_\Phi} \\ \frac{-(k - \gamma)}{L_b} & s + \frac{1}{C_\Phi R_H} \end{bmatrix} \times \\ \times \frac{1}{s^2 + \frac{s}{C_\Phi R_H} + \frac{(k - \gamma)^2}{L_b C_\Phi}} \begin{bmatrix} -I_{Lb} \\ C_\Phi \\ U_{\text{ВЫХ}} \\ L_b \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{\left(1 - s \frac{L_b}{R_H (k - \gamma)^2} \right) \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{k - \gamma}}{s^2 \frac{L_b C_\Phi}{(k - \gamma)^2} + s \frac{L_b}{R_H (k - \gamma)^2} + 1}. \quad (14)$$

$$W_{\text{ПН}}(s) = K_{\text{ПН}} \frac{1 - T_{\text{НФ}} s}{T_{\text{КЗ}}^2 s^2 + 2\xi T_{\text{КЗ}} s + 1}, \quad (15)$$

$$K_{\text{ПН}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{k - \gamma}; \quad T_{\text{НФ}} = \frac{L_b}{R_H (k - \gamma)^2};$$

$$T_{\text{КЗ}} = \sqrt{\frac{L_b C_\Phi}{(k - \gamma)^2}}; \quad \xi = \frac{1}{2R \cdot (k - \gamma)} \sqrt{\frac{L_b}{C_\Phi}}. \quad (16)$$

Для обеспечения стабилизации выходного напряжения необходимо ввести контур отрицательной обратной связи. На рис. 3 показаны варианты структурных схем стабилизатора напряжения с одноконтурным (рис. 3, а) и двухконтурным (рис. 3, б) способом управления.

Для обеспечения устойчивости системы в нее введено корректирующее устройство (КУ). На рис. 4 представлены частотные характеристики до введения корректирующего устройства и после. В данном случае в качестве КУ используется пропорционально-интегро-дифференцирующий регулятор [1].

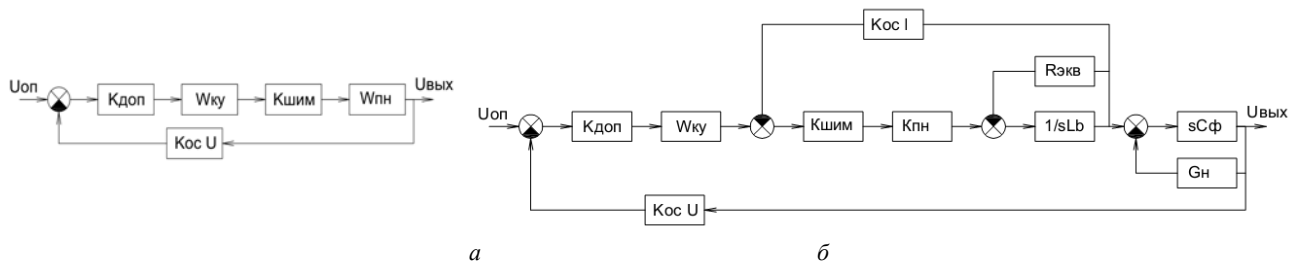


Рис. 3. Структурная схема ИСН с одноконтурным (а) и двухконтурным (б) способом управления

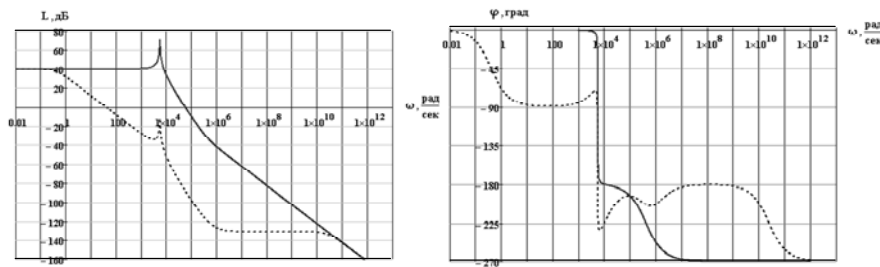


Рис. 4. Частотные характеристики ИСН

Для оценки качества регулирования было проведено численное моделирование в пакете Micro-Cap 9.0. На рис. 5 показаны переходные процессы выходного напряжения при изменении выходной мощности от 150 до 300 Вт при $U_{\text{ВХ}} = 50\text{В}$ ПНТ-преобразователя и классического преобразователя. Из рис. 5 видно, что ПНТ-преобразователь имеет больший коэффициент демпфирования по сравнению с классическим преобразователем при данном способе управления.

Для улучшения качества управления введем местную обратную связь по среднему току дросселя [6], как показано на рис. 3, б. Из рис. 6 видно, что при данном способе управления переходные процессы классического и ПНТ преобразователя существенно не отличаются и отклонение от заданного напряжения составляет менее 3 %.



Рис. 5. Переходный процесс выходного напряжения при изменении выходной мощности от 150 до 300 Вт

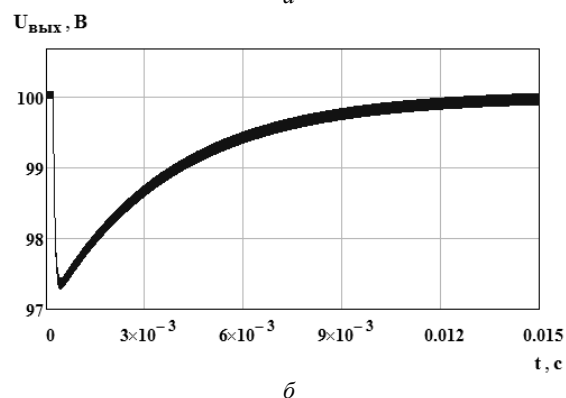
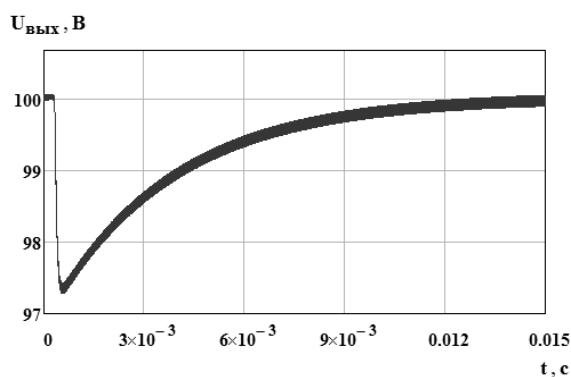


Рис. 6. Переходный процесс выходного напряжения при изменении выходной мощности: а – классический преобразователь; б – ПНТ-преобразователь

Так как на входе реального преобразователя стоит солнечная батарея (СБ), которая является нелинейным источником тока с ненулевой выходной емкостью, то динамический анализ далее будем проводить, заменив идеальный входной источник напряжения моделью СБ.

Вольт-амперная характеристика СБ описывается следующим уравнением:

$$I(U) = I_{\text{кз}} \left(1 + e^{f(U)} \right), \quad (17)$$

где

$$f(U) = \frac{(U - U_{\text{хх}}) \ln(1-i)}{U_{\text{хх}}(j-1)}; \quad i = \frac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{кз}}}; \quad j = \frac{U_{\text{опт}}}{U_{\text{хх}}}, \quad (18)$$

здесь $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания СБ; $U_{\text{хх}}$ – напряжение холостого хода СБ; $I_{\text{опт}}$, $U_{\text{опт}}$ – ток и напряжение в оптимальной рабочей точке. Выбираем следующие значения параметров СБ: $I_{\text{кз}} = 7,5\text{А}$, $U_{\text{хх}} = 80\text{В}$, $I_{\text{опт}} = 6\text{А}$, $U_{\text{опт}} = 70\text{В}$, $C = 1\text{мкФ}$.

На рис. 7 показан переходной процесс выходного напряжения при изменении выходной мощности от 150 до 300 Вт и моделью СБ в качестве первичного источника. Сравнивая переходные процессы на рис. 6 и 7, можно сделать вывод, что замена СБ источником напряжения не оказывает заметного влияния на динамику системы.

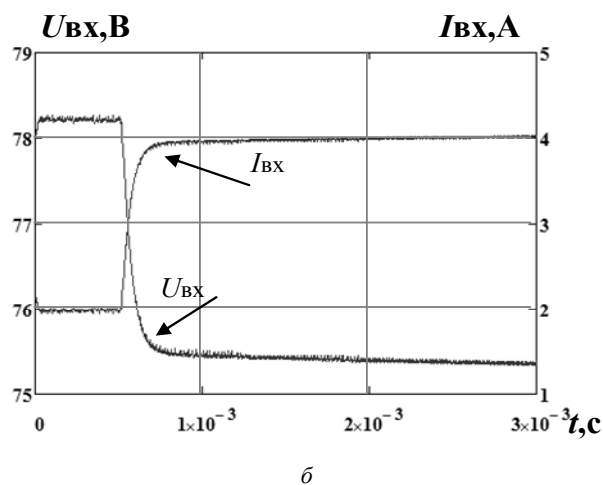
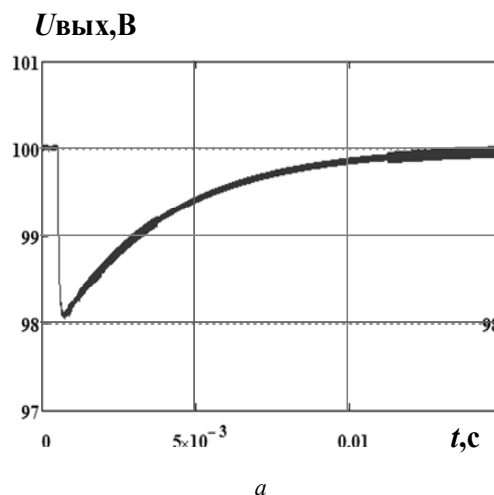


Рис. 7. Переходные процессы выходного напряжения (а) и входного тока (б)

На рис. 8 показаны диаграммы токов через индуктивности РК и напряжений на ключах имитационной модели преобразователя, построенной в пакете схемотехнического моделирования Micro-Cap 9.0, а на рис. 9 показаны их экспериментальные осциллограммы. Высокая степень совпадения формы и параметров сигналов в силовой части ПН за один цикл преобразования подтверждает адекватность имитационной модели, а значит и правомерность ее использования для анализа динамических режимов ПН данного типа.

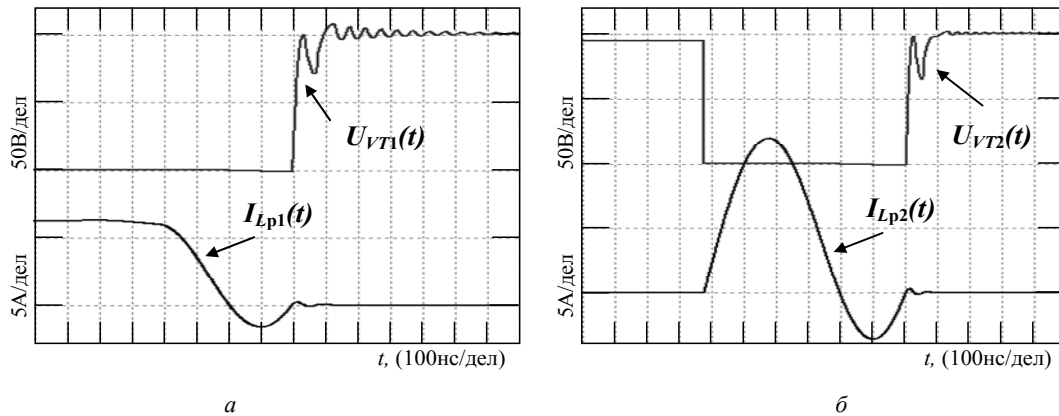


Рис. 8. Диаграммы токов через индуктивности РК и напряжений на ключах

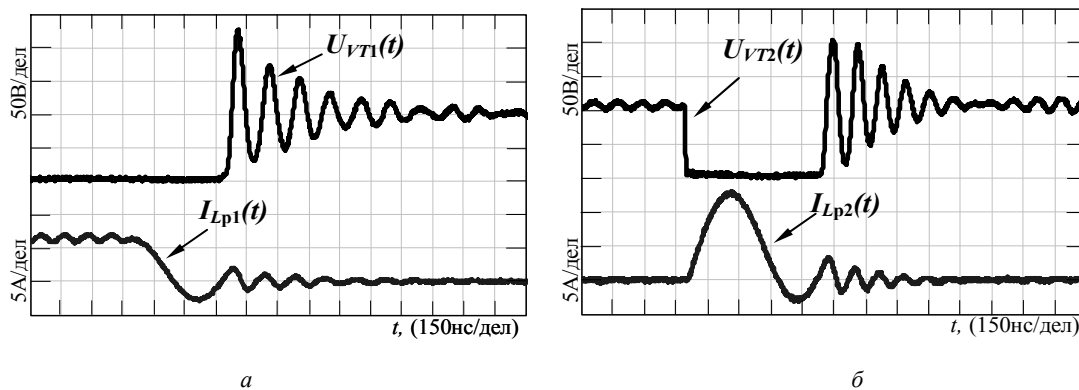


Рис. 9. Осциллограммы токов через индуктивности РК и напряжений на ключах

Результаты моделирования показали, что резонансный контур увеличивает коэффициент демпфирования системы. При одноконтурном регулировании колебательность переходных процессов значительно меньше по сравнению с классическим ШИМ преобразователем при прочих равных условиях. Двухконтурный способ управления не дает существенной разницы между исследуемым ПН и традиционным. Это позволяет применять оба способа регулирования для предлагаемого ПН.

Библиографические ссылки

1. Erickson R. W. Fundamentals of Power Electronics / 1st ed. New York : Chapman and Hall. 1997.
2. Hsiu L., Goldman M., Carlsten R., Witulski F., Kerwin W. Characterization and Comparison of Noise Generation for Quasi-Resonant and Pulsedwidth-Modulated Converters // IEEE Trans. Power Electronics. 1994. Vol. 9. №. 4. P. 425–432. July.

3. Лукин А. В. Квазирезонансные преобразователи постоянного напряжения // Электропитание. 1993. Вып. 2. С. 24–37.

4. Cho B. H. Novel zero-current-switching (ZCS) PWM Switch Cell Minimizing Additional Conduction Loss // IEEE Transactions on industrial electronics. 2002. Vol. 49. № 1. P. 165–171.

5. Hamar J., Funato H., Ogasawara S., Dranga O., Tse C. K. Multimedia Based e-Learning Tools for Dynamic Modeling of DC-DC Converters. *IEEE International Conference on Industrial Technologies*. Hong Kong. 2005. P. 17–20,

6. Mitchell D., Mammano B. Designing Stable Control Loops // Unitrode Texasinstruments. Power Supply Design Seminar. 2001. Topic 5. P. 5–1, 5–30.

© Горяшин Н. Н., Зорин А. Н., 2013

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТУРНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ДЛЯ ПОИСКА ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ХАФА

А. Г. Зотин, Ю. В. Борисов, А. С. Лисица

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: zotin@sibsau.ru, borisoff@sibsau.ru, lisizaandrey@sibsau.ru

Рассматривается метод Хафа для поиска линий, а также способы формирования контурных представлений. Приведено описание алгоритмов, их формирования и метода бинаризации Отсу. Выполнена сравнительная оценка методов формирования контуров для поиска линий с учетом различных способов бинаризации. Представлены результаты экспериментов для различных изображений.

Ключевые слова: анализ изображений, контурные представления, метод Робертса, метод Лапласа, метод Собела, бинаризация, метод Отсу, метод Хафа.

COMPARATIVE ANALYSIS OF EDGE DETECTION METHODS FOR LINES SEARCH ON THE BASIS OF HOUGH TRANSFORM METHOD

A. G. Zotin, Yu. V. Borisov, A. S. Lisitsa

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia.
E-mail: zotin@sibsau.ru, borisoff@sibsau.ru, lisizaandrey@sibsau.ru

The method of Hough transformation for line detection is considered in the article. Methods of edge representation generation and their algorithms are described. Binarization algorithms of an image are presented. The comparative evaluation of methods of formation of edge representation for lines detection, with the account of various ways of binarization, is given. Results of the experiments, carried out under different conditions, are presented.

Keywords: images analysis, edge representations, method of Roberts, method of Sobel, binarization, method of Otsu, method of Hough.

Системы компьютерного зрения и распознавания образов широко входят в обыденную жизнь современного человека. Компьютерное зрение позволяет эффективно решать различные задачи, связанные с анализом изображений или видеопоследовательностей. При автоматизированном анализе цифровых изображений очень часто возникает задача определения простых фигур, таких как прямые, круги или эллипсы. Преобразование Хафа может применяться в этих областях для распознавания контуров зданий на изображениях [1], нормализации ориентации текста на странице сканированного документа, определения линии горизонта [2], нахождения линий дорожной разметки и в прочих сферах [3].

Преобразование Хафа – метод, используемый в обработке изображений и компьютерном зрении, который предназначен для поиска параметрических и непараметрических объектов с использованием процедуры голосования. Данный метод основывается на представлении объекта интереса в виде параметрического уравнения [4; 5]. Параметры этого уравнения представляют собой фазовое пространство (аккумуляторный массив/пространство, пространство Хафа). Идея преобразования Хафа состоит в том, что для каждой точки пространства параметров подсчитывается число точек пространства, порождающих в про-

странстве параметров отклики. При этом на основе данных фазового пространства возможно восстановить параметры исследуемого объекта.

Классический алгоритм преобразования Хафа является наиболее простым в реализации и быстрым в работе. Он предназначен для нахождения прямых на изображении. В этом случае фазовое пространство получается двумерным, так как любую линию можно задать двумя параметрами её уравнения [6; 7]. При формировании фазового пространства целесообразно использование нормального уравнения прямой:

$$R = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

где R – длина перпендикуляра, опущенного из начала координат на прямую; θ – угол между положительным направлением оси OX и направлением этого перпендикуляра R .

Использование в качестве параметров фазового пространства угла θ и длины перпендикуляра (радиуса) R обусловлено тем, что в случае применения параметров уравнения прямой с угловым коэффициентом $y = k \cdot x + b$ будет невозможно представить в фазовом пространстве прямую, параллельную оси OY .

Для реализации преобразований Хафа используется аккумуляторный массив, сформированный на основе параметров θ и R , которые выступают в качестве

индексов элементов в массиве. Значение каждого элемента равно количеству точек, принадлежащих прямой (в пространстве исходного изображения), которая описывается соответствующими индексными значениями. Размерность фазового пространства с индексом R представляет количество пикселей, расположенных на диагонали изображения.

Алгоритм выполнения преобразования Хафа (рис. 1) можно представить в виде последовательности шагов.

Шаг 1. Задание параметров для фазового пространства. На этом шаге выполняется задание диапазона углов θ и расчет максимальной длины перпендикуляра (радиуса) $R_{\max}$, рассчитываемой по формуле

$$R_{\max} = \sqrt{I_{\text{width}}^2 + I_{\text{height}}^2}, \quad (2)$$

где I_{width} – ширина изображения; I_{height} – высота изображения.

Шаг 2. Задание размерности фазового пространства Хафа для угла (θ) и для радиуса (R).

Шаг 3. Создание матрицы, в которую заносятся данные о количестве точек, лежащих на прямой с заданными параметрами, PhaseSpace (R, θ).

Шаг 4. Анализ каждой точки изображения. Если точка принадлежит контуру (в бинарном виде контурного представления она представлена белым цветом), то переход к шагу 5. В противном случае анализируется следующая точка изображения. Когда рассмотрены все точки изображения, переход к шагу 6.

Шаг 5. Проверка каждой прямой на возможность прохождения через точку (x, y). Для выполнения проверки перебираются все возможные углы наклона и все возможные расстояния от начала координат. Для каждого значения угла θ и расстояния R проверка выполняется согласно выражению

$$|x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta - R| \leq TS, \quad (3)$$

где x, y – координаты точки в пространстве изображения; θ, R – значения параметров фазового пространства; TS – порог задания точности аппроксимации.

В случае истинности выражения увеличивается значение аккумуляторного массива с соответствующими параметрами. Когда рассмотрены все точки

фазового пространства для анализируемой точки изображения, переход к шагу 4.

Шаг 6. Визуализация фазового пространства (рис. 1, б) и формирование массива параметров фазового пространства PhasePar, который содержит в себе следующие элементы: угол θ , длину перпендикуляра R , значение аккумулятора для этих параметров Counter. В массив включаются элементы, содержащие ненулевое значение элемента Counter.

Шаг 7. Сортировка массива PhasePar по убыванию. Сортировка выполняется при помощи любого метода. Так, для увеличения быстродействия можно использовать метод Шелла.

Шаг 8. Отрисовка на основании массива PhasePar найденных линий (рис. 1, в) по точкам для θ, R , которые получены в результате преобразования.

При обработке цветных цифровых изображений точность определения линий во многом зависит от контурного представления изображения и параметров аппроксимации в фазовом пространстве. Методы формирования контурных представлений широко применяются в различных задачах, например для поиска наложенного текста [3], в задачах улучшения качества изображений [8], а также при сегментации [9] и анализе параметров объектов в различных сферах [10; 11]. Наиболее известными являются методы Робертса, Превита, Собела и Лапласа [9; 10].

Первые три метода представляют собой дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенное значение градиента яркости изображения. В результате показывается, насколько резко или плавно меняется яркость изображения в каждой точке, а значит, вероятность нахождения точки на грани, а также ориентация границы. Дискретный лапласиан в свою очередь определяется как сумма вторых производных и вычисляется, как сумма перепадов на соседях центрального пиксела.

Метод Робертса, как показывает практика, является самым простым и самым быстродействующим. В данном методе используется маска 2×2 вида

$$\begin{bmatrix} G & D \\ D & D \end{bmatrix},$$

где G – пиксел, с которым ведется работа; D – соседние пиксели.

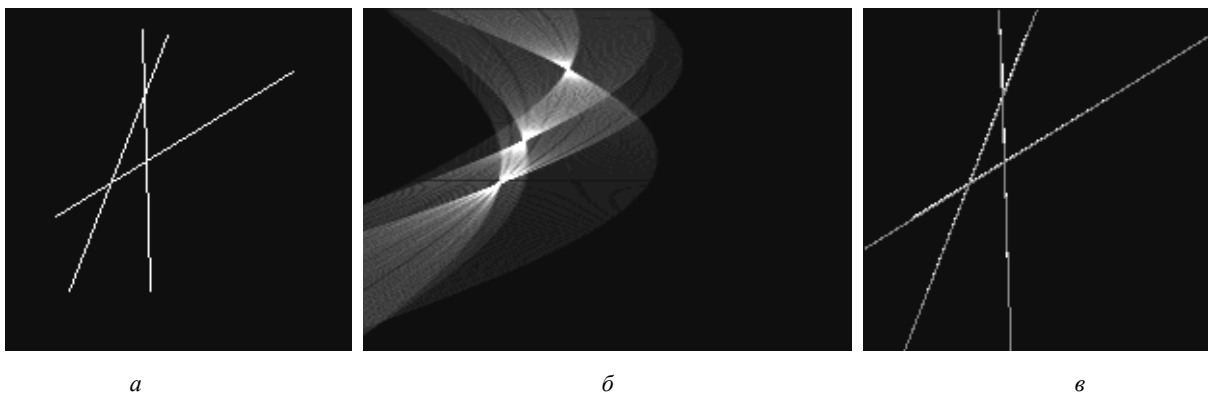


Рис. 1. Примеры изображений формируемых при выполнении преобразования Хафа: а – исходное изображение; б – фазовое пространство; в – найденные линии

Операторы Робертса

$$Gx = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} \quad Gy = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix},$$

используются для расчета значения нового пиксела по формулам

$$G = \sqrt{Gx^2 + Gy^2} \quad G = |Gx| + |Gy|, \quad (4)$$

Методы Превита и Собела аналогичны методу Робертса – они также основаны на вычислении градиента и работают с масками 3×3 следующего вида:

$$\begin{vmatrix} D & D & D \\ D & G & D \\ D & D & D \end{vmatrix},$$

где G – пиксел, с которым ведется работа; D – соседние пикселы;

Для расчета нового значения методы Превита и Собела также используют выражение (4). Основное их отличие заключается в самих операторах:

– операторы Превита:

$$Gx1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix}, \quad Gy1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix},$$

$$Gx2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{vmatrix}, \quad Gy2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{vmatrix};$$

– операторы Собела:

$$Gx1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix}, \quad Gy1 = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix},$$

$$Gx2 = \begin{vmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -2 \end{vmatrix}, \quad Gy2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Метод Лапласа относится к группе цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой, основанной на теории линейных систем и применении двумерных свертков. Обработка изображения с применением таких фильтров описывается формулой

$$I_{new}(x, y) = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^n \alpha_{k,l} \cdot I_{old}(x - m/2 + k, y - n/2 + l), \quad (5)$$

где I_{new} , I_{old} – новые и старые значения пикселов изображения; $\alpha_{k,l}$ – коэффициент, определяющий эффект фильтра; m , n – константы, задающие размер фильтра. При наложении фильтра Лапласа коэффициент α может иметь различный вид (рис. 2):

– коэффициент Лапласа с положительным ядром:

$$\alpha = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix}, \quad \alpha = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix};$$

– коэффициент Лапласа с отрицательным ядром:

$$\alpha = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad \alpha = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

На рис. 2 отображены примеры контурных представлений некоторых методов.

Как можно заметить из рис. 2, метод Собела дает более плотное описание линий контуров, метод Робертса учитывает меньше градиентных переходов, метод Лапласа с отрицательным ядром подчеркивает внешние границы, а с положительным ядром – внутренние.

Прежде чем выполнять обработку контурного представления методом Хафа, необходимо выполнить бинаризацию. Бинаризацию можно выполнить с использованием фиксированного порога, адаптивного порога на основе значений максимума и минимума или порога, вычисленного методом Отсу [12].

Метод Отсу заключается в том, что порог разделения пикселей подбирается так, чтобы классы светлых и темных пикселей были наиболее далеки друг от друга. Для этого значения гистограммы яркости представляются в виде случайного распределения. Затем ищется порог, при котором внутриклассовая дисперсия (сумма отклонения от математического ожидания) будет минимальной. Это соответствует максимизации межклассовой дисперсии

$$(\sigma_{кл})^2 = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot (a_1 - a_2)^2, \quad (6)$$

где ω_1 и ω_2 – значения вероятности первого и второго классов; a_1 и a_2 – средние арифметические значения для каждого из классов.

Для расчета значений вероятностей классов с учетом порога используются выражения:

$$\omega_1(t) = \sum_{i=0}^t p_i, \quad \omega_2(t) = \sum_{i=t+1}^{\max} p_i = 1 - \omega_1, \quad (7)$$

где p_i – вероятность распределения i -го элемента гистограммы; t – значение порога.

Обобщенная форма алгоритма вычисления порога методом Отсу:

Шаг 1. Формирование гистограммы и вероятностей p_i распределения интенсивностей.

Шаг 2. Анализ гистограммы. Начиная с порога $t = 1$ происходит проход через всю гистограмму, на каждом шаге выполняются следующие действия:

Шаг 2.1. Пересчитывается дисперсия $\sigma_{кл}(t)$.

Шаг 2.2. Если на каком-то шаге дисперсия оказалась больше максимума, то дисперсия обновляется и $T = t$.

Еще один метод бинаризации – максиминный. В нем выполняется расчет глобального порога бинаризации T на основе минимума (min) и максимума (max) интенсивности для всего изображения согласно формуле

$$T = \frac{\max + \min}{2}. \quad (8)$$



а



б



в



г

Рис. 2. Примеры работы методов по выделению контурных линий:
а – метод Собела с вычислением градиента по всем направлениям; б – метод Робертса;
в – метод Лапласа с отрицательным ядром; г – метод Лапласа с положительным ядром

Проанализировав представленные методы бинаризации на тестовых изображениях, авторы сделали вывод о том, что наиболее эффективным из перечисленных методов глобальной бинаризации по качеству обработки (величина ошибок до 30 % и меньше) является метод Отсу. К его недостаткам относится размытие линий, потеря тонких линий [12; 13]. Примеры бинаризации контурных представлений показаны на рис. 3.

Для проведения экспериментальных исследований было разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять формирование контурных представлений на основе яркости изображения. Схема организации модулей экспериментального программного обеспечения представлена на рис. 4.

Для анализа описанных методов формирования контурных представлений был проведен ряд экспериментов, который заключался в следующем: на тестовых фотографиях отмечались важные линии (каркасные линии, имеющие значение при построении модели помещения), после этого с помощью реализованных методов программа находила линии и сохранялись параметры и результаты их работы. Для проведения экспериментов были отобраны 100 различных фотографий, сделанных в разных условиях: 40 фотографий были сделаны внутри помещений, имеющих длинный центральный коридор; 30 фотографий были сделаны внутри помещений, имеющих четкие разгра-

ничительные линии (между стенами и потолком, стенами и полом); остальные фотографии были выполнены в условиях плохой различимости линий (сливающиеся, тонкие, искаженные). Выполнение оценки методов формирования контурных представлений осуществлялось для бинаризации методом Отсу и с использованием адаптивного порога на основе максимальных и минимальных значений гистограммы. Бинаризация со статическим порогом была исключена, поскольку она очень сильно зависит от величины отклика, полученного при формировании контурного представления, и условий освещения во время съемки. В качестве оценки использовались следующие критерии: процент точного определения искомых линий, процент дублирующих линий, процент ложно обнаруженных линий. В таблице представлены сводные данные для оценки методов.

На основе проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы. Одним из самых эффективных методов формирования контурного представления для поиска линий является метод Собела. По точности определения искомых линий он превышает остальные методы на 8...30 %. Его существенным недостатком является то, что на месте одной линии он находит несколько (с равным углом и сходным расстоянием). Количество этих линий лишь немногим меньше, чем в методе Превита. Характерной особен-

ностью этих линий является достаточно большой разброс (2...6 пикселей), в отличие от метода Лапласа (0...3 пикселя). Метод Собела также находит большое

количество посторонних (не основных) линий, причем по их количеству он уступает лишь методу Робертса на 7...8 %.

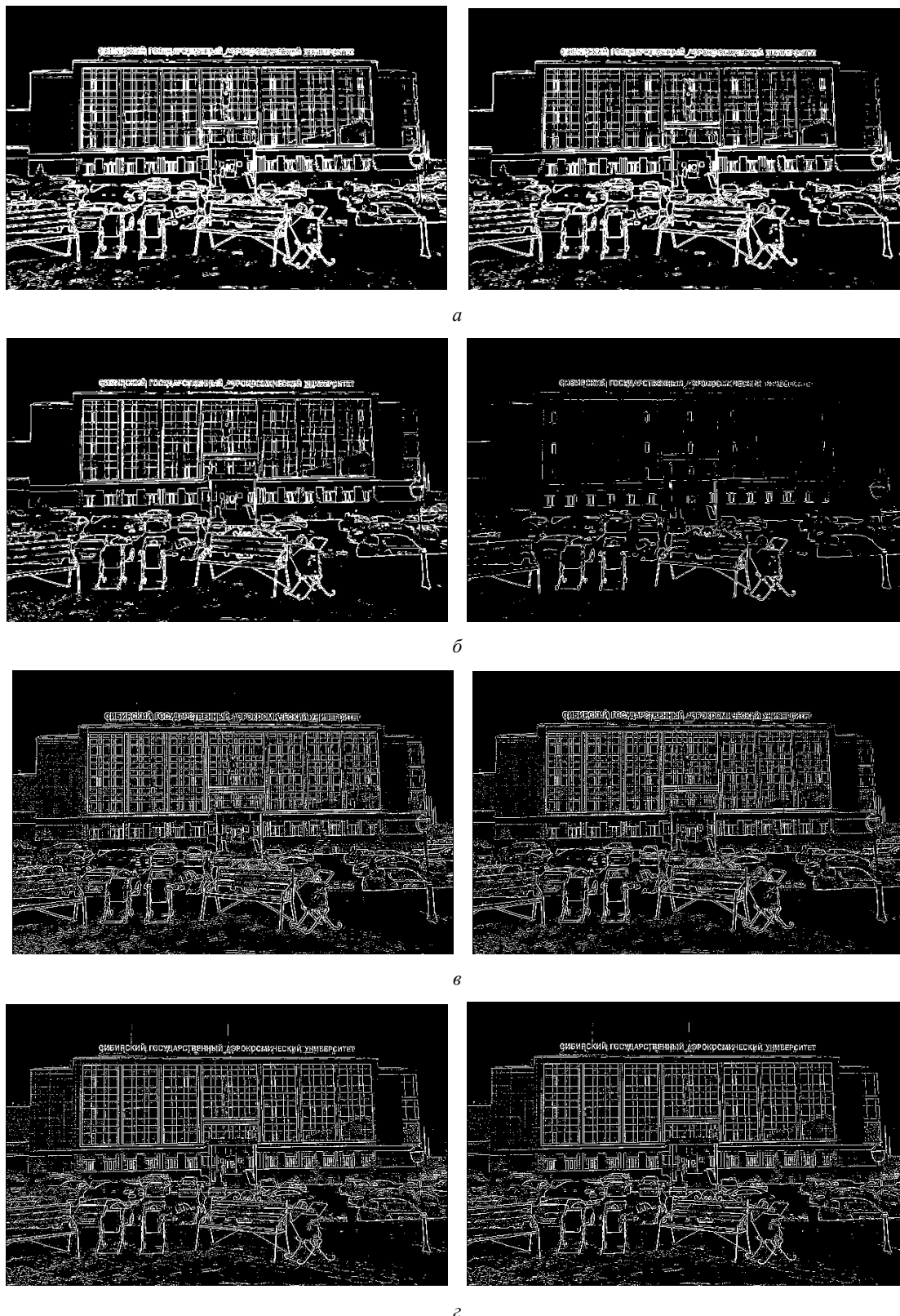


Рис. 3. Пример бинаризации контурных представлений методом Отсу (слева) и на основе Максиминого порога (справа):
 а – метод Собела с градиентом по всем направлениям; б – метод Робертса; в – метода Лапласа с отрицательным ядром; г – метод Лапласа с положительным ядром

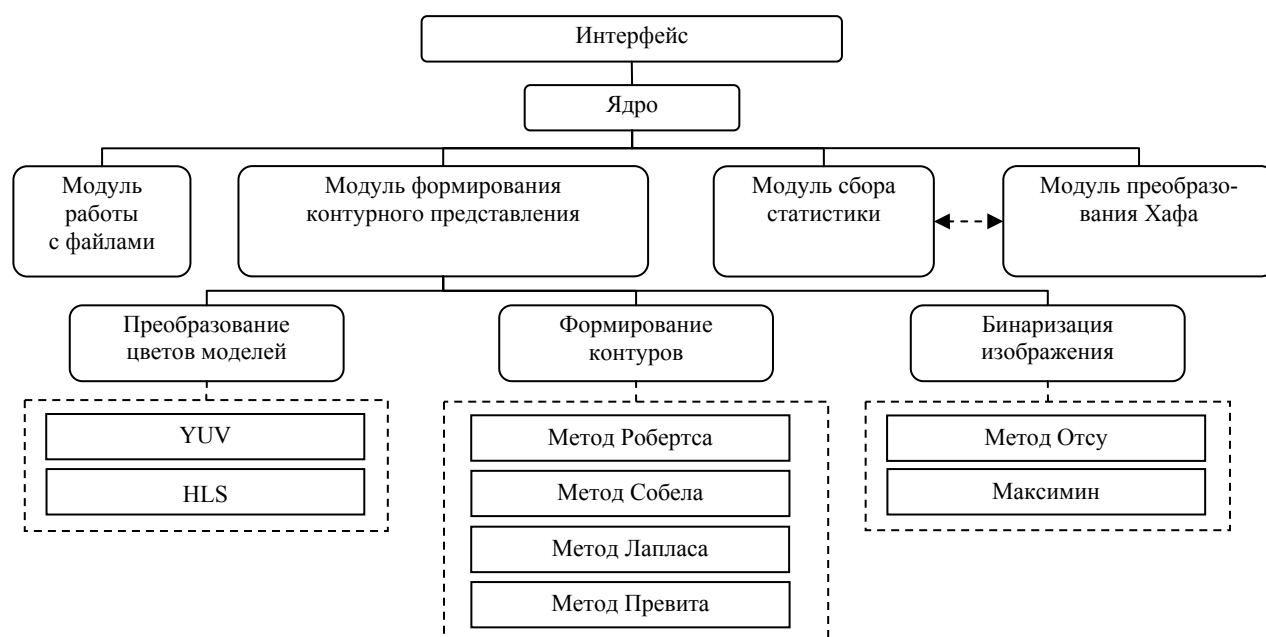


Рис. 4. Схема организации модулей экспериментального программного обеспечения

Оценка методов формирования контурных представлений

Методы формирования контурных представлений	Точность определения искомых линий, %		Ложное определение, %		Дублирующие линии, %	
	Отсу	максимум	Отсу	максимум	Отсу	максимум
Метод Собела (все направления)	80,2	52,1	17,3	2,7	28,1	16,8
Метод Собела (декартовы направления)	77,1	50,7	15,3	2,7	27,05	18,1
Метод Собела (диагональные направления)	73,4	50,3	14,6	5,6	28,35	16,7
Метод Превита (все направления)	79,2	48,3	16,1	2,8	31,05	16,8
Метод Превита (декартовы направления)	73,2	47,1	14,3	2,7	29,05	18,1
Метод Превита (диагональные направления)	72,8	47,4	16,2	4,9	28,35	16,7
Метод Робертса	71,6	12,3	18,3	2,9	25,15	8,6
Метод Лапласа (положительное ядро 4)	43,5	9,2	10,2	3,5	21,75	5,1
Метод Лапласа (положительное ядро 8)	49,2	43,1	12,8	2,7	23,1	20,5
Метод Лапласа (отрицательное ядро 4)	50,3	8,7	5,2	1,7	20,5	6,15
Метод Лапласа (отрицательное ядро 8)	48,4	48,1	5,4	2,5	19,2	23,05

Подводя итоги, можно сказать, что выбор метода формирования контурного представления в большей степени зависит от решаемых задач: если требуется найти как можно больше верных линий, то метод Собела будет наилучшим выбором; если же требуется, чтобы среди найденных линий присутствовало как можно меньше ложно определенных линий и допускается небольшая потеря основных линий, то целесообразно использование метода Лапласа. Для компенсации дублирующихся линий предлагается ввести следующую модификацию: при нахождении линий с одинаковым углом и сходной длиной перпендикуляра (различия на 2...4 пиксела) следует объединять их в одну линию, при этом итоговая длина перпендикуляра будет вычисляться как среднее арифметическое значение. Данная модификация позволит улучшить показатели методов Лапласа и Робертса за счет малого разброса их дублирующихся линий. По предвари-

тельными оценкам в методах Собела и Превита количество дублирующихся линий с применением модификации сократится в среднем на 60...70 %.

Библиографические ссылки

1. Arefi H., Engels J., Hahn M. and Mayer H. Levels of detail in 3D building reconstruction from lidar data // In proceedings of the International Achieves of the Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences. Beijing 2008. Vol. XXXVII. P. B3b. P. 485–490.
2. Коррекция наклона [Электронный ресурс]. URL: <http://bik-top.livejournal.com/37060.html> (дата обращения: 28.11.2012).
3. Зотин А. Г. Адаптивный метод обнаружения текстовых зон в видеопотоке на основе яркостных карт // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 1 (14). С. 34–38.

4. Image Transforms – Hough Transform [Electronic resource]. URL: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/hough.htm> (date of visit: 28.11.2012).
5. Tretiak E., Barinova O., Kohli P., Lempitsky V. Geometric image parsing in man-made environments // Intern. J. of Computer Vision. 2012. Vol. 97. № 3. P. 305–321.
6. Barinova O., Lempitsky V., Kohli P. On the Detection of Multiple Object Instances Using Hough Transforms // IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, San Francisco. 2010. P. 1–8.
7. Nixon M., Aguado A. S. Feature Extraction and Image Processing for Computer Vision. 3rd ed. // Academic Press, 2012.
8. Фаворская М. Н., Зотин А. Г., Пахирка А. И. Метод улучшения цветных изображений на основе выравнивания спектральных диапазонов и коррекции контрастности // Механика, управление и информатика. 2012. № 8. С. 99–103.
9. Muthukrishnan R., Radha M. Edge Detection Techniques for Image Segmentation // Intern. J. of Computer Science & Information Technology. 2011. Vol. 3. № 6. P. 259–267.
10. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М. : Техносфера, 2006.
11. Лукьяница А. А., Шишкин А. Г. Цифровая обработка видеоизображений. М. : Ай-Эс-Эс Пресс, 2009.
12. Sezgin M., Sankur B. Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation // J. of Electronic Imaging. 2004. Vol. 13(1). P. 146–165.
13. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9. № 1. P. 62–66.

© Зотин А. Г., Борисов Ю. В., Лисица А. С., 2013

УДК 519.8

САМОКОНФИГУРИРУЕМЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОДДЕРЖКИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА*

И. А. Иванов, Е. А. Сопов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ilyaiv92@gmail.com, evgenysopov@gmail.com

Предложен новый самоконфигурируемый многокритериальный алгоритм оптимизации на базе коэволюционного генетического алгоритма. Представлены результаты исследования эффективности подхода в сравнении с известными алгоритмами.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, множество Парето, эволюционные алгоритмы.

SELF-CONFIGURING GENETIC ALGORITHM FOR MULTI-OBJECTIVE CHOICE PROBLEM DECISION

I. A. Ivanov, E. A. Sopov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia
E-mail: ilyaiv92@gmail.com, evgenysopov@gmail.com

A novel self-configuring multi-objective algorithm of optimization, based on coevolutional genetic algorithm, is proposed. Results of algorithm efficiency investigation are presented.

Keywords: multi-objective optimization, Pareto set, evolutionary algorithms.

Большое число практических задач поддержки принятия решений в различных областях науки и техники сводятся к решению задачи выбора на множестве альтернатив. Такие задачи возникают на всех этапах поддержки принятия решений: при построении

аналитических моделей (выбор структуры и параметров модели), генерировании множества допустимых альтернатив, непосредственно при выборе наилучшей альтернативы в соответствии с некоторыми критериями. В реальных задачах число критериев, по кото-

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России» (2011-1.2.2-215-021, 2011-1.2.1-113-025), ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (2011-1.9-519-005-042).

рым оцениваются альтернативы, почти всегда больше одного.

Формально задача выбора сводится к задаче параметрической оптимизации некоторого функционала, где независимые переменные определяют альтернативы, а значение функционала – оценку качества выбора [1]. В случае с единственным критерием существует возможность нахождения наилучшего решения, обеспечивающего экстремум функционала. В случае многих критериев объективного решения не существует, так как необходимо обеспечить компромисс между конфликтующими критериями, а лицо, принимающее решение (ЛПР), должно осуществить субъективный выбор [2]. На практике исследователи часто упрощают многокритериальную задачу выбора до однокритериальной путем определения важности и свертки критериев. Не трудно понять, что компромисса можно достичь разными способами, а потому нет гарантии, что единственное решение по свертке будет приемлемо для ЛПР. Математически множество эффективных решений многокритериальных задач выбора определяется через понятие оптимальности по Парето [3]. Именно из множества Парето должен осуществляться финальный субъективный выбор, так как любое решение вне множества Парето является менее предпочтительным с математической точки зрения. При этом чем точнее и равномернее локализовано (аппроксимировано) множество Парето, тем эффективнее решена формальная задача многокритериальной оптимизации.

Практические задачи оптимизации обладают такими свойствами, как алгоритмическое задание функций, многоэкстремальность, сложная конфигурация допустимой области, наличие нескольких типов переменных, множества постоянства и т. д. Подобные задачи почти не решаются традиционными методами оптимизации. Проблема усугубляется необходимостью учета требования равномерности покрытия множества Парето. Наиболее перспективным подходом к решению подобных задач являются методы интеллектуальных информационных технологий, к которым, в частности, относятся генетические алгоритмы (ГА) [4–6].

Идея коэволюционного многокритериального генетического алгоритма. В последние годы предложено множество различных генетических алгоритмов, показавших высокую эффективность при решении многих сложных задач оптимизации. Для решения задач многокритериальной оптимизации наибольшее признание в мировом научном сообществе получили следующие алгоритмы: VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm) [7], FFGA (Fonseca and Fleming's Multi-Objective Genetic Algorithm) (иногда встречается под названием MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) [8], NPGA (Niche Pareto genetic algorithm) [9], NSGA2 (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) [9], SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) [10].

Каждый из алгоритмов обладает своими преимуществами и недостатками. В частности, алгоритмы VEGA и FFGA обладают лучшей сходимостью, но не имеют механизмов обеспечения равномерности по-

крытия множества Парето, алгоритмы NPGA, NSGA и SPEA обеспечивают хорошее покрытие, но требуют больше вычислительных затрат, а механизмы поддержания разнообразия решений часто выкидывают решения за пределы области Парето. В целом большинство исследователей отмечают алгоритм SPEA как наиболее универсальный [11].

Процесс настройки и контроля параметров конкретного ГА существенно влияет на эффективность решения задачи. Однако этот процесс слабо формализован и часто зависит от опыта и интуиции исследователя. В последние годы наблюдается развитие эволюционных подходов, способных к самонастройке параметров. Одним из подходов к построению самоорганизующихся (самонастраивающихся) процедур является использование коэволюционного подхода [11; 12].

Большинство работ, связанных с построением коэволюционных схем для многокритериальных ГА, используют схему кооперативной коэволюции [13–15]. Цель подобных алгоритмов – провести декомпозицию исходной задачи по переменным, по критериям, по функциональному назначению популяций и т. д. Оценка пригодности индивидов частного алгоритма (подзадачи) происходит с учетом оценок других индивидов. Подобные схемы коэволюционных ГА демонстрируют весьма высокие результаты, но требуют тщательной настройки как параметров частных алгоритмов, так и схем декомпозиции задачи и кооперации.

При использовании схемы конкурирующей коэволюции различные алгоритмы (популяции) развиваются параллельно и независимо в течение некоторого периода. После происходит оценка их эффективности, и вычислительные ресурсы перераспределяются от менее эффективных (на данном временном интервале) в пользу более эффективных. Также присутствуют элементы кооперативной коэволюции, в частности, миграция лучших индивидов. Таким образом, при использовании конкурирующей коэволюции нет необходимости определять наилучший для данной задачи (класса задач) алгоритм или его настройки – выбор алгоритма (настроек) осуществляется автоматически в ходе работы.

Очевидно, что использование коэволюционной схемы при решении многокритериальных задач позволит решить проблему конфигурирования алгоритма «под задачу». А поскольку различные алгоритмы обладают принципиально различными свойствами, то их совместная работа должна усилить использование индивидуальных сильных сторон и уменьшить влияние слабых. В предложенном подходе в ходе работы поискового алгоритма кроме адаптации численных параметров алгоритма (адаптация алгоритма), но и происходит выбор конкретной конфигурации алгоритма, эффективной на текущем этапе поиска. Такой подход можно назвать самоконфигурируемым многокритериальным ГА.

Авторы назвали такой алгоритм самоконфигурируемым многокритериальным генетическим алгоритмом SelfCOMOGA (Self-configuring Coevolutionary Multi-Objective Genetic Algorithm).

Общая схема коэволюционного алгоритма SelfCOMOGA. Схема имеет следующий вид:

Этап 1. Задание множества алгоритмов, участвующих в коэволюции.

Этап 2. Параллельная работа алгоритмов в течение заданного времени – периода адаптации.

Этап 3. Оценка эффективности индивидуальных алгоритмов в адаптационном периоде.

Этап 4. Перераспределение ресурсов и переход к очередному адаптационному периоду – на этап 2.

Рассмотрим эти этапы подробнее.

На первом этапе определяется множество конфигураций алгоритмов, включенных в коэволюцию. Можно выделить как минимум три стратегии:

- детерминированный выбор алгоритмов, свойства которых априори известны и могут быть использованы для решения задачи;

- включение всех возможных комбинаций алгоритмов и их параметров;

- случайный выбор некоторого числа алгоритмов из множества всех возможных комбинаций алгоритмов и их параметров.

Первая стратегия требует привлечения знаний об алгоритмах и решаемой задаче, что не применимо для сложных задач, и противоречит идее самонастройки ГА. Вторая стратегия – весьма затратна, так как число комбинаций может быть большим (сотни вариантов). Третья стратегия, как показывают численные эксперименты, обеспечивает приемлемую эффективность в среднем и при этом нет необходимости привлекать дополнительные сведения об алгоритмах и их свойствах на задаче (классе задач), а значит, этот вариант лучше всего обеспечивает концепцию самонастройки ГА.

Период адаптации является настраиваемым параметром. Эксперименты показали, что значение этого параметра индивидуально для каждой задачи и зависит от критериев, по которым оцениваются алгоритмы. Например, увеличение параметра дает улучшение по критерию расстояния до множества Парето, но ухудшает показатели покрытия множества Парето и наоборот. Более того, значение параметра определяется ограничением числа вычислений целевых функций (вычислительным ресурсом). Можно отметить, что при достаточном вычислительном ресурсе алгоритм в среднем малочувствителен к данному параметру. Тем не менее, данный вопрос необходимо в дальнейшем исследовать отдельно.

Ключевым моментом любой коэволюционной схемы является оценка эффективности индивидуальных алгоритмов. Поскольку эффективность оценивается по Парето, то нет возможности прямого сравнения алгоритмов и известные подходы не могут быть использованы. В различных работах предлагаются следующие основные критерии: близость найденного множества решений к истинному множеству Парето и равномерность распределения найденных решений. Очевидно, что для практических задач первый критерий теряет смысл, так как множество Парето неизвестно. Поэтому в данной статье для оценки индивидуальных алгоритмов, включенных в SelfCOMOGA, используются следующие критерии, объединенные в две группы.

Первая группа – статические критерии (оценка по результатам только текущего периода адаптации) – включает в себя два критерия:

- процент недоминируемых решений. Для вычисления создается общий пул решений из решений частных алгоритмов и проводится недоминируемая сортировка [8], а затем определяется, какому алгоритму принадлежат недоминируемые решения;

- равномерность распределения (разброс) недоминируемых решений. Для вычисления используется среднее значение дисперсии расстояний между индивидами по координатам (для множества Парето) или по критериям (для фронта Парето).

Вторая группа – динамические критерии (оценка в сравнении с результатами предыдущих периодов адаптации) – включает в себя еще один критерий – улучшение недоминируемых решений. Для вычисления необходимо сравнить недоминируемые решения алгоритма на прошлом и текущем периоде адаптации. Если текущие недоминируемые решения доминируют прошлые недоминируемые, то произошло улучшение решения задачи, даже если процент недоминируемых решений уменьшился.

Последний этап – этап перераспределения ресурсов. Для этого определяются новые размеры популяций. Все алгоритмы отдаются алгоритму-победителю некоторый процент от своих размеров популяции. При этом каждый алгоритм имеет минимальный гарантированный ресурс, который не распределяется.

В известных коэволюционных схемах каждый новый этап адаптации начинается с одинаковых стартовых точек и используется правило «лучший вытесняет худшего». Для многокритериального алгоритма данный подход не пригоден из-за требования обеспечения разнообразия Парето-оптимальных решений. А поскольку лучшие решения обеспечивают сходимость к множеству Парето, то для перераспределения ресурсов используется схема вероятностного отбора «замещение по ранговой селекции»: решения с высоким рангом после недоминируемой сортировки имеют большую вероятность быть переданными лучшим алгоритмам, с уменьшением ранга вероятность отбора линейно падает, но шанс быть отобранным остается у всех решений.

Критерии останова коэволюционного алгоритма аналогичны критериям стандартных ГА: ограничение на вычислительный ресурс, отсутствие улучшений (стагнация) и др.

Тестовые задачи и численные эксперименты. Авторами было проведено исследование эффективности алгоритма SelfCOMOGA на 19 тестовых функциях, которые условно можно объединить в две группы:

- функции 1–6 представляют собой различные тестовые задачи двух переменных. Критерии включают в себя как простые квадратичные функции, так и сложные – (Растригина, Розенброка). Число критериев – от двух до четырех. Данные функции удобны тем, что помимо численных оценок с их помощью можно визуализировать множества и фронт Парето;

- функции 7–19 приняты международным сообществом специалистов по оптимизации на конференции CEC (2009) в качестве сложных задач и рекомендованы

для оценки многокритериальных ГА [16]. Это функции FON, POL, KUR, ZDT1-4, ZDT6, F2, F5, F8, UP4, UP7.

Некоторые результаты тестирования алгоритмов приведены в табл. 1 и 2. Тестирование алгоритма проводилось при следующих условиях. В коэволюцию включены пять различных алгоритмов VEGA, FFGA, NPGA, NSGAII и SPEA, параметры которых выбирались случайно из множества:

Тип скрещивания: одноточечное, двухточечное, равномерное.

Вероятность мутации: высокая, средняя, низкая.

Максимальный размер множества Парето (для SPEA): 30, 50, 70.

Радиус ниши (для FFGA и NPGA): 1, 3, 5.

Размер множества сравнения (для NPGA): 3, 5, 7.

Также в таблицах представлены результаты индивидуальной работы базовых алгоритмов, для которых приведены оценки при лучших параметрах, найденных при индивидуальном тестировании.

На каждой задаче для оценки эффективности проводилось 100 независимых запусков алгоритмов. Частные результаты усреднялись. Статистика обрабатывалась с помощью метода дисперсионного анализа – метода непараметрической оценки Манна–Уитни. Различия результатов, представленных в табл. 1, статистически значимы.

В качестве критериев для сравнения эффективности работы алгоритмов выбраны следующие два набора метрик:

Для задач с аналитически заданным множеством и фронтом Парето (F2, F5, F8, UP4, UP7) использовались общепринятые метрики: Generational Distance (GD), Maximum Spread (MS), Spacing (S).

Критерий GD характеризует различие между найденным (PF) и истинным (PF*) фронтом Парето:

$$GD = \frac{1}{n_{PF}} \left(\sum_{i=1}^{n_{PF}} d_i^2 \right)^{1/2}$$

где $n_{PF} = |PF|$; d_i – евклидово расстояние (в пространстве критериев) между i -м членом PF и ближайшим членом PF*. В идеальном случае $GD = 0$.

Критерий MS – характеризует то, насколько хорошо PF* покрыто PF, большие значения MS показывают, что большая часть PF* покрыта PF:

$$MS = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[\frac{\min\{\overline{PF_i}, \overline{PF_i^*}\} - \max\{\underline{PF_i}, \underline{PF_i^*}\}}{\overline{PF_i^*} - \underline{PF_i^*}} \right]^2},$$

где $\overline{PF_i}$ и $\underline{PF_i}$ – максимальное и минимальное значение i -й целевой функции в PF; $\overline{PF_i^*}$ и $\underline{PF_i^*}$ – максимальное и минимальное значения i -й целевой функции в PF*; M – количество целевых функций.

Критерий S – характеризует равномерность распределения недоминируемых решений по фронту Парето:

$$S = \frac{1}{d'} \left(\frac{1}{n_{PF}} \sum_{i=1}^{n_{PF}} (d'_i - \overline{d'})^2 \right)^{1/2},$$

$$\overline{d'} = \frac{1}{n_{PF}} \sum_{i=1}^{n_{PF}} d'_i$$

где $n_{PF} = |PF|$, d_i – Евклидово расстояние (в пространстве критериев) между i -м членом PF и ближайшим членом PF*.

1. Для остальных задач сравнение алгоритмов проводилось относительно друг друга на основе недоминируемой сортировки. Для вычисления значений по критериям решения всех исследуемых алгоритмов объединились в общий пул и проводилась недоминируемая сортировка.

Критерий минимального ранга алгоритма K1 – наименьший ранг, который имеет алгоритм после недоминируемой сортировки в общем пуле.

Критерий доли решения с минимальным рангом K2 – процент популяции, имеющий ранг, определённый критерием K1.

Критерий разброса решений с минимальным рангом K3 – дисперсия расстояний в пространстве критериев для решений, имеющий ранг, определённый критерием K1.

Таблица 1

Оценки эффективности алгоритмов на задачах с аналитически заданным множеством и фронтом Парето (набор метрик 1)

Задача	Критерий	SPEA	VEGA	FFGA	NPGA	NSGAII	Self COMOGA	MEAN
F2	GD	0,849	1,468	3,334	1,699	0,263	0,460	1,522
	MS	0,750	0,768	2,928	0,730	0,850	0,832	1,205
	S	1,289	0,446	0,096	0,400	0,525	1,483	0,551
UP4	GD	0,421	0,441	0,616	0,616	0,426	0,266	0,504
	MS	0,928	0,933	1,127	0,905	0,928	0,973	0,964
	S	0,368	0,612	0,218	0,279	0,340	0,464	0,363
UP7	GD	1,149	1,881	4,683	2,274	0,305	0,629	2,058
	MS	0,719	0,757	1,571	0,713	0,785	0,792	0,909
	S	1,459	0,444	0,092	0,358	0,556	1,735	0,582

Таблица 2

Оценки эффективности алгоритмов на задачах, для которых неизвестны аналитические выражения множества и фронта Парето (набор метрик 2)

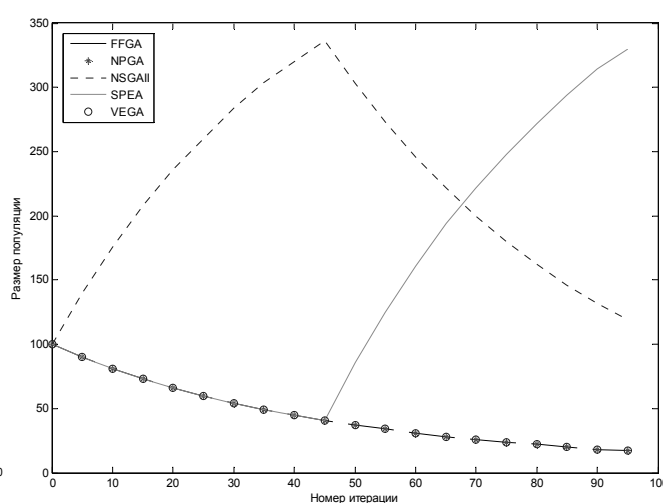
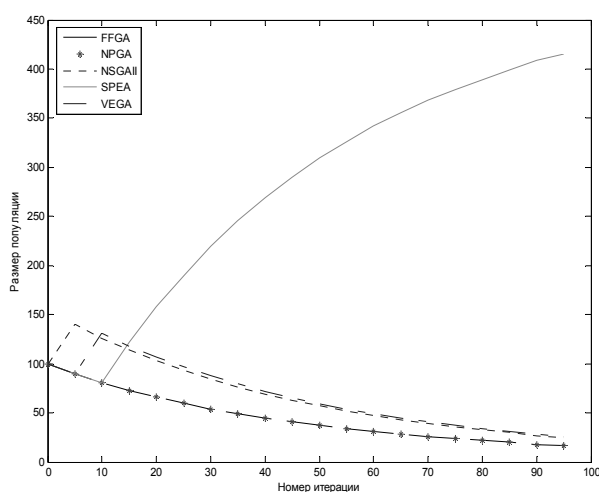
Задача	Критерий	SPEA	VEGA	FFGA	NPGA	NSGAII	Self COMOGA	MEAN
F2 (Schaffer's function)	K1	2	1	26	2	1	1	7
	K2	0,349	0,357	0,610	0,365	0,424	0,330	0,421
	K3	0,000002	0,000002	0,143085	0,000002	0,000001	0,000001	0,029
4 квадра- тичные функции	K1	1	1	48	2	1	1	11
	K2	0,208	0,158	0,813	0,147	0,277	0,273	0,321
	K3	0,000005	0,000006	0,407079	0,000013	0,000005	0,000005	0,081422
FON	K1	1	1	27	1	1	1	6
	K2	0,196	0,084	0,631	0,087	0,330	0,353	0,266
	K3	0,455	0,504	1,002	0,547	0,394	0,374	0,580
POL	K1	1	1	10	1	1	1	3
	K2	0,228	0,083	0,214	0,062	0,344	0,316	0,186
	K3	0,198	0,202	0,324	0,125	0,133	0,169	0,196
KUR	K1	1	1	21	2	1	1	5
	K2	0,190	0,158	0,620	0,101	0,344	0,358	0,283
	K3	0,691	0,699	0,395	0,676	0,743	0,741	0,641
ZDT1	K1	3	9	26	10	2	1	10
	K2	0,158	0,115	0,318	0,297	0,578	0,993	0,293
	K3	0,239	0,521	0,758	0,455	0,206	0,159	0,436
ZDT6	K1	4	21	48	12	1	1	17
	K2	0,210	0,235	0,627	0,230	0,162	0,948	0,293
	K3	0,458	0,703	1,100	0,655	0,380	0,311	0,659

В табл. столбец MEAN определяет среднее значение критерия по пяти индивидуальным алгоритмам (для сравнения с результатами алгоритма SelfCOMOGA).

Можно отметить, что на множестве задач эффективность коэволюционного алгоритма в среднем может оказаться хуже лучшего из индивидуальных алгоритмов, но всегда выше средней эффективности по индивидуальным алгоритмам. Поскольку в реальных задачах исследователь не знает заранее, какой алгоритм выбрать и какие настройки использовать, то применение самоконфигурируемого коэволюционного ГА кажется весьма перспективным.

Ниж представлены два примера динамики перераспределения ресурсов: для условно простой задачи (квадратичные критерии) – на рисунке слева – и для сложной – справа.

Как видно из графиков, для простых задач метод SPEA может доминировать на протяжении всего времени работы. Однако эффективность коэволюционного алгоритма в среднем оказывается выше, чем у SPEA отдельно. Более того, в коэволюционном алгоритме параметры SPEA выбираются случайно (не оптимально), а значит несмотря на его победу на всех этапах адаптации, общий эффект достигается за счет совместной работы различных алгоритмов.



Динамика распределения ресурсов SelfCOMOGA

Предложенный в данной статье подход позволяет эффективно решать сложные задачи многокритериальной оптимизации, обеспечивая репрезентативную аппроксимацию множества Парето, а использование конкурентной коэволюции позволяет автоматизировать конфигурирование алгоритма под задачу.

Для достаточно простых задач наибольший вклад в коэволюционную динамику вносит алгоритм SPEA, однако эффективность коэволюционного алгоритма в среднем оказывается выше, чем у SPEA самостоятельно, так как при распределении ресурсов все алгоритмы имеют минимальный гарантированный ресурс и дополняют SPEA различными поисковыми стратегиями.

Для более сложных задач преимущества SPEA менее очевидны. В основном этот алгоритм получает больший ресурс на завершающих стадиях, когда требуется поддержка равномерности покрытия множества Парето. На этапе локализации множества Парето ресурс достается алгоритмам, которые с большей скоростью сходятся к парето-оптимальным решениям (в частности, алгоритм VEGA).

В дальнейшем авторы планируют расширить область применения предложенного подхода для автоматизирования проектирования интеллектуальных информационных технологий в задачах интеллектуального анализа данных [17], в которых равномерность покрытия множества Парето обеспечивает разнообразие представлений моделей знаний.

Библиографические ссылки

1. Таха Х. А. Введение в исследование операций : пер. с англ. 7-е изд. М. : Вильямс, 2005.
2. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. М. : Логос, 2000.
3. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. М. : Радио и связь, 1992.
4. Goldberg D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Reading, MA : Addison-Wesley, 1989.
5. Modified Probabilistic Genetic Algorithm for the Solution of Complex Constrained Optimization Problems / F. Yu. Vorozheikin, T. N. Gonchan, I. A. Panfilov et al. // Vestnik SibSAU. 2009. Iss. 5 (26). P. 31–36.
6. Сопов Е. А. Вероятностные генетические алгоритмы оптимизации сложных систем // Saarbruecken : Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012.
7. Schaffer J. D. Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms // Proc. of an Intern. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications, Pittsburgh, PA, 1985. P. 93–100.
8. Fonseca C. M., Fleming P. J. Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization // Proc. of the 5th Intern. Conf. on Genetic Algorithms. San Mateo, California, 1993. P. 416–423.
9. Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D. E. A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization // Proc. of the 1st IEEE Conf. on Evolutionary Computation. Piscataway, 1994. Vol. 1. P. 82–87.
10. Zitzler E., Thiele L. Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1999. Vol. 3. №. 4. P. 257–271.
11. Sergienko R. Multistep Fuzzy Classifier Forming with Cooperative-Competitive Coevolutionary Algorithm // Advances in Swarm Intelligence : Proc. of the 3rd Intern. Conf. Shenzhen, China, 2012. Pt. I.
12. Ficici S. G. Solution Concepts in Coevolutionary Algorithms : A Doctor of Philosophy Diss. Brandeis University, 2004.
13. Tan K. C. A Cooperative Coevolutionary Algorithm For Multiobjective Optimization // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Systems, Man & Cybernetics: The Hague, Netherlands, 2004.
14. Goh C. K. A Competitive-Cooperation Coevolutionary Paradigm for Multi-Objective Optimization // Proc. of the 22nd IEEE Intern. Symp. on Intelligent Control. Singapore, 2007. P. 255–260.
15. Zeng F. Studies on Pareto-Based Multi-Objective Competitive Coevolutionary Dynamics // Proc. of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2011.
16. Multiobjective optimization Test Instances for the CEC 2009 Special Session and Competition // Proc. of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Norway, 2009.
17. Сопов Е. А., Сопов С. А. Интеллектуальные информационные технологии выявления и диагностики проблем в задачах анализа сложных систем // Вестник СибГАУ. 2011. 4 (37). С. 84–89.

© Иванов И. А., Сопов Е. А., 2013

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О. А. Иконников, В. Ф. Первушин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: pervushin_vf@inbox.ru

Рассматривается задача идентификации и построения моделей стационарных линейных динамических объектов с запаздыванием в условиях непараметрической неопределенности. Изучаются модели динамических объектов высокого порядка. Рассматривается задача построения модели объекта в состоянии, характеризуемом ненулевыми начальными условиями. В качестве моделей динамических объектов используются интегралы Дюамеля и Коши-ОЛагранжа. Используются непараметрические методы восстановления кривых регрессии для построения моделей характеристик объектов. Получены результаты, позволяющие говорить о возможности построения достаточно качественных моделей стационарных линейных динамических объектов с запаздыванием в условиях непараметрической неопределенности. Полученные результаты могут быть применены в автоматических системах управления технологическим процессом производства или переработки и иных областях, в которых используются средства автоматического управления.

Ключевые слова: модель, динамическая система, непараметрическая модель, начальные условия, дифференциальное уравнение высокого порядка.

STUDY OF NONPARAMETRIC MODELS OF DYNAMIC SYSTEMS

O. A. Ikonnikov, V. F. Pervushin

Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: pervushin_vf@inbox.ru

The problem of identification and construction of models of stationary linear dynamic objects with delay in conditions of non-parametric uncertainty is observed. The goal of this work was to study models of dynamic objects of the high order. The problem of construction of a model of an object in a state characterized by non-zero initial conditions is considered. Duhamel and Cauchy-Lagrange integrals are used as models of dynamic objects. Non-parametric restoration methods of regression curves are used for construction of models of characteristics of objects. The results obtained demonstrate the possibility of construction of adequate quality models of stationary linear dynamic objects with delay in conditions of non-parametric uncertainty. The results can be applied in the field of automatic process control of production or processing and other fields, where tools for automatic control are used.

Keywords: model, dynamic system, nonparametric model, initial state, differential equation of high order, inertia.

Рассматривается случай, когда исследователь вынужден работать с объектом, при этом относительно немного зная об этом объекте. В этом случае предполагается, что исследователь обладает лишь информацией о качественном поведении объекта, способен наблюдать за поведением объекта, а при некоторых ограничениях – еще и намеренно воздействовать на объект. Ситуации, которые описаны выше, возникают довольно часто, особенно в тех областях деятельности человека, в которых по разным причинам отсутствуют точные модели объектов; отсутствуют точные средства контроля поведения объектов, а также изменения среды, взаимодействующей с ними; ресурсоемкость задач изучения и управления объектами по сравнению с пользой, полученной при решении задач, ставит под сомнение рентабельность мероприятий, направленных на поиск этих решений. Данный список, наверное, может быть продолжен, так как наличие большого количества факторов, влияющих на выбор цели, априорную постановку задачи, поиск средств и методов решения, реализа-

цию решения и контроль его применения, позволяет говорить о большом числе ситуаций, в которых оказывались и будут оказываться люди, сталкивающиеся с подобными задачами. Авторы статьи, предлагают собственные идеи решения таких задач с указанием конкретных методов решения некоторых из них.

Описание проблемной ситуации. Предположим, что в ходе изучения объекта (путем наблюдения за этим объектом или аналогичными объектами, а также поиска информации в источниках, описывающих поведение объекта) исследователь владеет следующей информацией: объект относится к классу детерминированных стационарных линейных динамических объектов с запаздыванием.

Предположим также, что исследователь способен воздействовать на объект и контролировать уровень своего воздействия. Таким образом, исследователь может компенсировать недостаток информации об объекте, препятствующий достижению целей с удовлетворительными результатами.

Предположим, что в силу ограниченности средств изучения и аппарата, используемого исследователем для описания объекта, не все факторы, влияющие на объект, будут учтены в модели. Следствием данного предположения является наличие случайных помех во всех измерениях, полученных исследователем в ходе взаимодействия с объектом. Кроме того, в данной статье мы будем руководствоваться предложением о том, что у исследователя нет информации о помехах, с которыми ему предстоит работать, либо эта информация не представляет достаточной практической ценности. Иначе говоря, будем считать, что законы распределения случайных помех, действующих внутри объекта при взаимодействии объекта с окружающей средой и действующих в каналах связи с объектом, неизвестны.

Последнее предположение заключается в том, что любая другая информация об объекте, его моделях недоступна исследователю либо не удовлетворяет его целям.

В таких условиях исследователь может потратить достаточно большое количество ресурсов: вычислительных, материальных, производственных, научных и, в конце концов, финансовых, прежде чем найти решение. Однако можно с уверенностью сказать, что современные достижения в области решения подобных задач позволяют исследователю пойти несколькими путями в поисках решения. Выбор того или иного пути предполагает необходимость вложения различного количества ресурсов для решения задачи (причем в случае сравнения этих путей даже на априорной стадии исследований могут выявиться пути, заведомо более или менее ресурсоемкие по отношению к другим путям). Кроме того, естественно утверждение о том, что выбор пути решения задачи будет влиять на результат её решения, возможность достижения исследователем поставленных целей.

Задача данной работы заключается в построении модели объекта в условиях, которые описаны выше. В этом случае не ставится задача достижения высокого качества модели; задача заключается в описании методики, которая может применяться для моделирования и привести к удовлетворительному качественному результату в каждой конкретной области деятельности и каждой конкретной задаче. Кроме того, предполагается использовать методы, позволяющие решить задачу с небольшими, возможно даже минимальными, издержками ресурсов, получая при этом достаточно качественные решения.

Методика решения. Для решения поставленной задачи предлагается взять за основу модели свертки характеристик объекта, характеристик, воздействующих на объект, и характеристик, которые описывают реакции объекта на такие воздействия. Речь идет о моделях в виде интеграла Дюамеля и интеграла Коши–Лагранжа. Математические записи интеграла Дюамеля и интеграла Коши–Лагранжа приведены ниже в (2), причем для наглядности приведена скалярная запись обоих уравнений (случай, когда входные воздействия и выходные реакции объекта описываются одномерными функциями времени):

$$x(t) = \int_{t_0}^t h'(t-\tau)u(\tau)d\tau, \quad (1)$$

$$x(t) = f(t-t_0) + \int_{t_0}^t h'(t-\tau)u(\tau)d\tau, \quad (2)$$

где $x(t)$ – выходная реакция объекта, который наблюдается в течение времени t , начиная с момента времени t_0 ; $h'(t)$ – импульсная-переходная характеристика объекта, связанная с переходной характеристикой объекта $h(t)$ оператором дифференцирования $dh(t)/dt = h'(t)$; $u(t)$ – входное воздействие на объект, которое приводит к изменению его реакции $x(t)$; $f(t)$ – свободная составляющая движения объекта – характеристика, описывающая поведение объекта в нестабильном начальном состоянии. Таким образом, можно сказать, что модель (1) является описанием объекта в стабильном начальном состоянии в отличие от модели (2), которая позволяет учитывать нестабильное начальное состояние объекта.

Характеристики $u(t)$ и $x(t)$ могут наблюдаться в ходе экспериментов, проводимых с объектом при помощи разнообразных средств контроля, начиная от органов чувств исследователей, контрольно-измерительных инструментов и заканчивая электронными измерительными датчиками. Характеристики $h(t)$ и $f(t)$ (временные характеристики объекта) являются характеристиками, идентифицирующими сам объект, зависят от внутренней структуры объекта, а информация о поведении этих характеристик позволяет получить исчерпывающее описание поведения объекта. Таким образом, можно говорить о том, что для того чтобы построить модель объекта в определенных выше условиях достаточно описать временные характеристики объекта и использовать эти описания при поиске модели так, как это показано в (1) и (2).

Одним из наиболее простых и наглядных методов описания временных характеристик объекта (идентификации объекта) является метод, основанный на наблюдении за поведением объекта в условиях, когда на объект воздействуют при помощи специальных тестовых воздействий. С описанием нескольких подобных методов читатель может познакомиться в справочнике [1]. В данной статье рассматривается метод временных характеристик, предполагающий воздействие на объект с помощью характеристики $u(t)$ таким образом, чтобы на выходе объекта наблюдались реакции $x(t)$, соответствующие временным характеристикам объекта $h(t)$ (или $h'(t)$) и $f(t)$.

Так, для того чтобы найти описание переходной характеристики объекта при помощи метода временных характеристик, необходимо на вход объекта подать тестовый сигнал, описываемый функцией Хевисайда $1(t)$. На выходе объекта будет наблюдаться реакция, приближенно повторяющая поведение переходной характеристики объекта. Данный эксперимент проиллюстрирован на графике на рис. 1.

На рис. 1 изображены характеристика $u(t)$, воздействующая на объект (непрерывная линия), и реакция

объекта на воздействие $x(t)$ (изображена точками). При подаче на вход объекта воздействия наблюдается запаздывающая реакция объекта на это воздействие, время запаздывания объекта обозначено t_3 . Кроме этого из опыта, изображенного на рис. 1, можно заметить наличие случайных помех, оказывающих влияние на измерения реакции объекта – проблему, с которой неизбежно предстоит столкнуться исследователю и поэтому учтенную в данной статье.

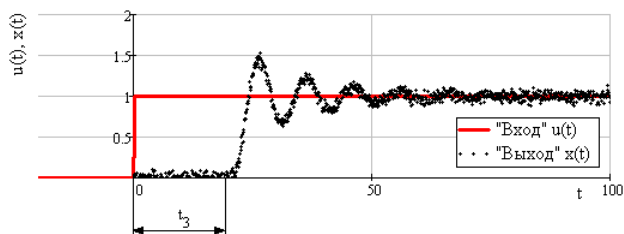


Рис. 1. Переходная характеристика $h(t)$

Для описания поведения свободной составляющей движения объекта достаточно привести объект в интересующее нестабильное начальное состояние с последующим прекращением воздействий на объект. Так, на выходе объекта будет наблюдаться реакция объекта, приближенно повторяющая свободную составляющую движения объекта. Иллюстрация опыта по идентификации свободной составляющей движения объекта приведена на графике на рис. 2.

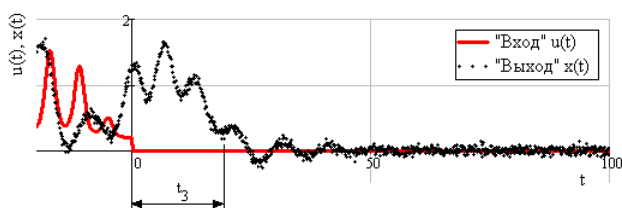


Рис. 2. Свободная составляющая движения объекта $f(t)$

На рис. 2 изображено, как при помощи входного воздействия $u(t)$ в интервале времени меньше момента времени $t = 0$, происходит направление объекта к интересующему нестабильному начальному состоянию. Далее в интервале времени от $t = 0$ до $t = 100$, воздействие на объект прекращается и на выходе объекта наблюдается запаздывающая по времени на величину t_3 реакция объекта $x(t)$, соответствующая свободной составляющей движения объекта, описывающая объект в этом нестабильном начальном состоянии.

Восстановив поведение временных характеристик объекта по наблюдениям этих характеристик, полученных в результате проведения экспериментов с объектом, можно перейти к построению модели самого объекта в виде (1) и (2).

Непараметрическое моделирование. Для восстановления поведения временных характеристик в данной статье предлагается использовать методы непараметрической статистики и, в частности, непараметрические оценки Надарая–Ватсона [2] и оценки При-

стли [3]. Использование данных методов обусловлено тем фактом, что исследователь находится в условиях непараметрической неопределенности, не владеет априорной информацией, позволяющей при ограниченности ресурсов, находить параметрическое описание характеристик объекта. Более подробно о непараметрическом моделировании можно узнать в [4].

Кроме того, авторами предлагается использовать модифицированные оценки регрессии Пристли [5], позволяющие находить описание импульсной переходной характеристики объекта по наблюдениям переходной характеристики:

$$h'_s(t) = \left[s(c_s^h)^2 \right]^{-1} \sum_{i=1}^s h(t_i) H'((t - t_i)/c_s), \quad (3)$$

где $h'_s(t)$ – непараметрическая оценка импульсной переходной характеристики объекта, построенная по выборке значений переходной характеристики объекта $h(t_i)$, в моменты времени t_i ; s – объем выборки значений $h(t_i)$; c_s^h – параметр размытости непараметрической оценки (3); $H(\cdot)$ – колоколообразная функция непараметрической оценки.

Для описания свободной составляющей движения объекта предлагается использовать непараметрические оценки Надарая–Ватсона:

$$f_s(t) = \left[s \cdot c_s^f \right]^{-1} \sum_{i=1}^s f(t_i) \cdot H((t - t_i)/c_s), \quad (4)$$

где $f_s(t)$ – непараметрическая оценка свободной составляющей движения объекта; $f(t_i)$ – значение свободной составляющей движения объекта в момент времени t_i ; c_s^f – параметр размытости непараметрической оценки.

Использование оценок (3) и (4) для описания временных характеристик объекта, позволяет построить модель выходной характеристики объекта:

$$x_s(t) = f_s(t - t_0) + \int_{t_0}^t h'_s(t - \tau) u(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $x_s(t)$ – непараметрическая модель реакции объекта на входное воздействие $u(t)$. Одно из первых упоминаний о таких моделях встречается в [6].

Для оценки качества полученных моделей предлагается использовать следующие критерии: ошибку моделирования выходной реакции объекта Q_1 (6), описывающую отклонение реакции модели от реакции объекта в одинаковых условиях, и критерий, отражающий качество модели в относительных показателях, которые лучше усвоить и оценить человеку, среднюю абсолютную относительную ошибку моделирования выходной реакции объекта Q_2 :

$$Q_1 = s^{-1} \sum_{i=1}^s (x(t_i) - x_s(t_i))^2, \quad (6)$$

$$Q_2 = s^{-1} \sum_{i=1}^s |(x(t_i) - x_s(t_i))/x(t_i)| 100 \%, \quad (7)$$

где $x(t_i)$ – значение выходной характеристики объекта в момент времени t_i .

Объекты высокого порядка. Для демонстрации работы предложенного алгоритма было решено выбрать класс объектов, характеризующихся высоким порядком. Другими словами, такие объекты могут быть описаны дифференциальными уравнениями высоких порядков. Основанием для выбора такого класса объектов послужила цель – исследование применимости предложенного метода построения моделей таких довольно сложно описываемых объектов.

В качестве объекта моделирования было решено использовать параметрическую модель объекта, заданную в виде дифференциального уравнения десятого порядка, (8), реализованную на ЭВМ:

$$\begin{aligned} & \frac{d^{10}}{dt^{10}} x(t) + 0,7636 \frac{d^9}{dt^9} x(t) + \\ & + 4,0512 \frac{d^8}{dt^8} x(t) + 2,3679 \frac{d^7}{dt^7} x(t) + \\ & + 6,3677 \frac{d^6}{dt^6} x(t) + 2,7259 \frac{d^5}{dt^5} x(t) + \\ & + 4,8623 \frac{d^4}{dt^4} x(t) + 1,3807 \frac{d^3}{dt^3} x(t) + \\ & + 1,8037 \frac{d^2}{dt^2} x(t) + 0,2596 \frac{d}{dt} x(t) + \\ & + 0,2596 x(t) = u(t - t_3). \end{aligned} \quad (8)$$

Далее эту модель будем называть объектом, подразумевая, что это лишь его имитация, созданная для демонстрации работы метода.

Для описания объекта в условиях неустойчивого начального состояния был приведен объект в интересное состояние с последующим прекращением воздействия на объект. На выходе наблюдается реакция объекта, соответствующая свободной составляющей движения объекта. Значения входной и выходной характеристики объекта наблюдались с равными задержками во времени, так что общий объем значений характеристик составил 5 000. На выходе наблюдались реакция объекта со случайной аддитивной помехой, интенсивность которой равна 5 % от амплитуды реакции объекта. Результаты опыта приведены на рис. 3.

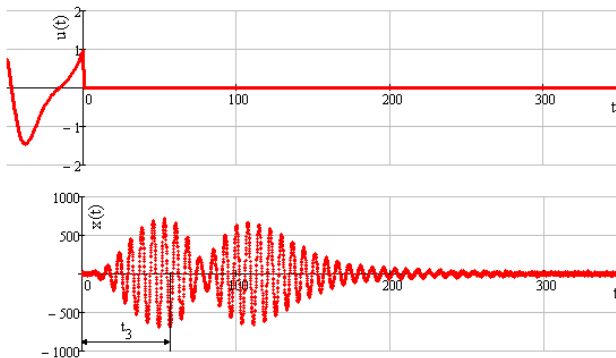


Рис. 3. Идентификация $f(t)$ (графики входной и выходной характеристик объекта)

Далее на вход объекта в успокоившемся состоянии подавалось воздействие, соответствующее функции Хевисайда, на выходе наблюдалась реакция объекта, соответствующая переходной характеристике объекта. Аналогично предыдущему опыту, было измерено 5 000 значений входной и выходной характеристик объекта, причем на выходе объекта наблюдались значения с аддитивной помехой интенсивностью 5 % относительно амплитуды выходной реакции объекта. Этот опыт проиллюстрирован на рис. 4.

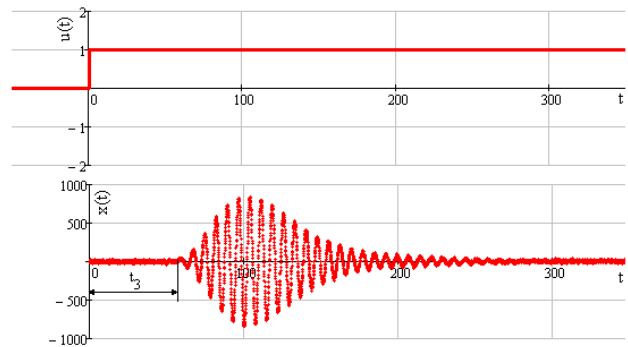


Рис. 4. Идентификация $h(t)$ (графики входной и выходной характеристик объекта)

Далее по выражениям (3) и (4) с параметрами $c_s^h = 0,7$, $c_s^f = 0,35$, $H(t) = [(\cos(\pi t) + 1)/2] \cdot [1(t + 1) - 1(t - 1)]$ ($1(t)$ – функция Хевисайда) было найдено непараметрическое описание временных характеристик объекта. Графики полученных непараметрических оценок приведены на рис. 5 и 6.

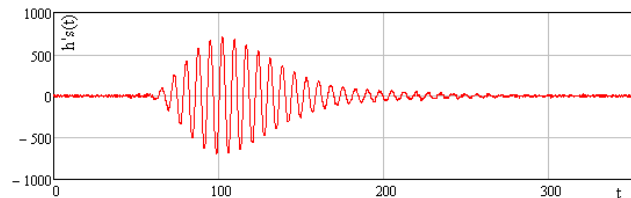


Рис. 5. Непараметрическая оценка импульсной переходной характеристики объекта

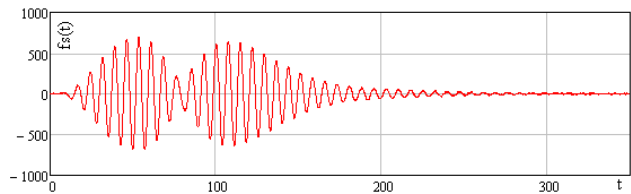


Рис. 6. Непараметрическая оценка свободной составляющей движения объекта

С использованием выражения (5) построена непараметрическая модель объекта, позволяющая описать реакцию объекта на произвольное входное воздействие с учетом неустойчивого начального состояния объекта.

В следующем опыте проводилось сравнение полученной непараметрической модели объекта с реакцией самого объекта (заданного в виде дифференциро-

ванного уравнения) путем сравнения при помощи критериев (6) и (7) реакций объекта и модели на одинаковое входное воздействие. На вход объекта и на вход модели подавалось воздействие, изображенное на графике на рис. 7. На выходе объекта и на выходе модели регистрировались соответствующие реакции, обе эти реакции также приведены на графике на рис. 7.

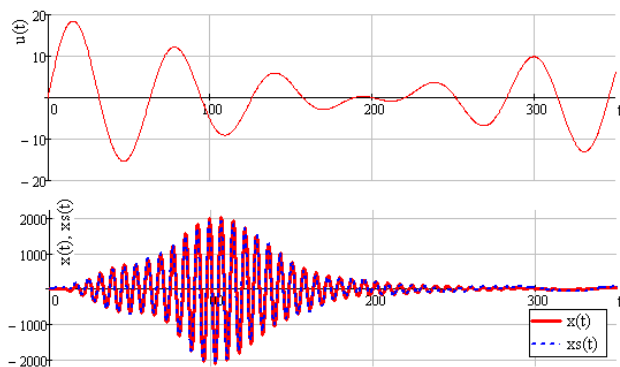


Рис. 7. Сравнение реакций объекта и модели на одинаковое воздействие

Значения критериев качества полученной модели объекта составили соответственно $Q_1 \approx 1000$, $Q_2 \approx 20\%$. Эти показатели говорят о том, что полученная модель значительно удалась от показателей объекта. Впрочем, полученное качество модели оказывается удовлетворительным в условиях, когда исследователь не владеет практически никакой информацией для изучения и формирования гипотез относительно объекта исследований.

Такие, на первый взгляд, невзрачные результаты моделирования говорят о том, что остается ещё множество не решенных (или решенных недостаточно хорошо) задач в области изучения подобных объектов. Однако если брать во внимание, что решенная задача построения моделей объектов высоких порядков может быть отнесена к задачам сложным и ресурсоемким, и если учесть, что условия, в которых решалась задача, могут оказаться непреодолимой преградой для решения этой задачи для многих подготовленных и опытных исследователей, то полученные результаты представляются значимыми, как с точки зрения развития теоретических методов, так и с точки зрения прикладных приложений для решения подобных задач. Кроме того, подчеркнем тот факт, что используемые методы не требуют наличия большого

количества информации высокого качества. Этот факт говорит о низкой ресурсоемкости метода и незначительном уровне издержек для решения задач с использованием предложенного метода.

Полученные результаты позволили сделать вывод о возможности описания объектов, относящихся к классу стационарных линейных динамических объектов с запаздыванием и высокого порядка в условиях неопределенности. Актуальность полученных результатов говорит о новых возможностях в изучении окружающего мира и возможностях его освоения в таких сферах, где раньше это было попросту невозможно либо чрезмерно дорого. Непараметрические модели объектов позволяют строить гипотезы и предположения относительно объектов изучения, позволяя совершенствовать модели вплоть до достижения этим моделям уровня фундаментальных законов. Кроме того, непараметрические модели, впрочем, как и любые другие, могут служить основанием для решения иных задач, к которым относятся задачи поддержки принятия решений при управлении объектами либо задачи непосредственного управления этими объектами.

Библиографические ссылки

1. Красовский А. А. Справочник по теории автоматического управления. М. : Наука, 1987.
2. Надарая Э. А. Непараметрические оценки кривой регрессии // Труды ВУ АН ГрССР. Вып. 5. Тбилиси. 1965. С. 55–68.
3. Priestley M. B., Chao M. T. Nonparametric Function Fitting // J. of the Royal Statistical Soc. Series B. Vol. 34. 1972. P. 385–392.
4. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (30). С. 4–9.
5. Сергеева Н. А. Непараметрические алгоритмы идентификации и управления линейными динамическими системами : дис. ... канд. тех. наук. Красноярск, 1998.
6. Medvedev A. V. Identification and Control for Linear Dynamic Systems of Unknown Order // Optimization Techniques IFIP Technical Conf. Berlin ; Heidelberg ; New-York : Springer-Verlag, 1975. P. 48–55.

© Иконников О. А., Первушин В. Ф., 2013

**МОДЕЛИ ГЕРТ-СЕТЕЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПРИМЕНЕНИЯ
МЕТОДОЛОГИИ МУЛЬТИВЕРСИЙ***

И. В. Ковалев, П. В. Зеленков, М. В. Сарамуд, Г. А. Сидорова, В. В. Брезицкая

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: kleniks@yandex.ru

Описываются различные способы применения методологии мультиверсий при разработке отказоустойчивого программного обеспечения, а также представлены модели мультиверсионных программных архитектур в виде базовых ГЕРТ-сетей. С учетом необходимого и достаточного условия функционирования мультиверсионного модуля выбран узел с IOR входом и детерминированным выходом для представления участка сети, описывающего данный модуль. Приводятся формулы расчета вероятностно-временных характеристик мультиверсионных модулей, обеспечивающие пригодность ГЕРТ-сетевых моделей для описания мультиверсионного программного обеспечения. Это позволяет использовать эквивалентные преобразования и существующие методы расчета ГЕРТ-сетей.

Ключевые слова: стохастическая сеть, вероятностно-временной анализ, мультиверсионность, отказоустойчивость, программное обеспечение.

**MODEL OF GERT-NETWORKS FOR DIFFERENT WAYS OF USAGE
OF MULTI-VERSION METHODOLOGY**

I. V. Kovalev, P. V. Zelenkov, M. V. Saramud, G. A. Sidorova, V. V. Brezitskaya

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: kleniks@yandex.ru

This article describes different ways of application of multi-version methodology in the development of multi-version fail-safe software, and presents models of multi-version software architectures in the form of basic GERT-networks. With respect to the necessary and sufficient condition for the operation of multi-version module, the node with IOR input and output is selected to provide deterministic network section that describes the module. Formulas for calculation of probabilistic-time characteristics of multi-version modules, that provide fitness of GERT-network models to describe multi-version software, are presented. This allows to use the equivalent conversion and existing methods of calculation of GERT-networks.

Keywords: stochastic network, probabilistic-timing analysis, multi-versioning, fail safety, software.

Мультиверсионная отказоустойчивость основана на использовании двух или более версий (или вариантов) модуля программного обеспечения (ПО), исполняемых последовательно или параллельно. Версии используются как альтернативы (с отдельными средствами обнаружения ошибок), в парах (чтобы осуществить обнаружение проверками дублирования) или в больших группах (чтобы маскировать ошибки через голосование) [1]. Использование множественных версий обосновывается предположением о том, что по-разному построенные компоненты (т. е. различными проектировщиками, различными алгоритмами, различными инструментальными средствами проектирования и т. д.) должны иметь разные ошибки. Поэтому если одна версия производит сбой на специфическом вводе, то по крайней мере одна из альтернативных версий должна обеспечить корректный вывод [2]. В данной статье описываются различные способы применения методологии мультиверсий для разработки

отказоустойчивого ПО, а также приводятся модели мультиверсионных программных архитектур в виде ГЕРТ-сетей.

1. Необходимое и достаточное условие функционирования мультиверсионного модуля отказоустойчивого ПО. Необходимым и достаточным условием функционирования мультиверсионного модуля является выполнение хотя бы одной мультиверсии [3]. Поэтому в общем случае участок сети описывающий мультиверсионный блок программного обеспечения, будет иметь детерминированный выход и узел с IOR-входом. Выбор данного типа узла связан с тем, что этот узел по определению активируется при выполнении любой дуги, входящей в него. Строго говоря, данный узел с IOR входом не будет IOR узлом в классическом понимании, а служит лишь для отображения случая выполнения необходимого и достаточного условия функционирования мультиверсионного модуля (выполнения единственной мультиверсии)

* В рамках государственного задания высшим учебным заведениям 8.5534.2011.

и в конечном счете вся подсеть, используя эквивалентное преобразование, будет заменена одним блоком.

Рассмотрим расчет сети, описывающей мультиверсионную архитектуру ПО, которая содержит IOR-вход и детерминированный выход (рис. 1) и состоит из нескольких подсетей (рис. 2).

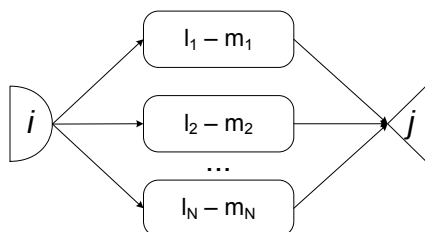


Рис. 1. IOR-вход

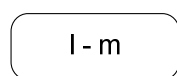


Рис. 2. Произвольная подсеть с начальным узлом l и конечным узлом m

Необходимо учитывать, что j – вычисляемый IOR-вход, имеющий стохастическое начало в узле i . $\{l_1 - m_1\}, \{l_2 - m_2\}, \dots, \{l_N - m_N\}$ – N непересекающихся подсетей [4].

При увеличении числа модулей в мультиверсионной подсети вероятность отказа всех модулей будет снижаться, а вероятность того, что хотя бы один из модулей сработает, будет расти. Также следует учесть, что время работы N модулей будет не больше времени работы $t_{\max}$, где $t_{\max}$ – максимальное время работы мультиверсионного модуля, входящего в набор N .

Пусть p_{ij} – вероятность того, что операция (i, j) будет выполнена при условии, что узел i выполнен и $F_{ij}(t)$ – функция условной вероятности распределения времени выполнения работы (i, j) , тогда имеем

$$p_j = p_i [1 - (1 - p_{l1, m1k})(1 - p_{l2, m2k}) \dots (1 - p_{lN, mNk})], \quad (1)$$

$$F_j(t) = \max(t_{l1, m1k}, t_{l2, m2k}, \dots, t_{lN, mNk}). \quad (2)$$

Следует также учитывать, что при увеличении числа мультиверсионных модулей в системе, будет возрастать время на межмодульное взаимодействие. Другими словами, при организации параллельной работы N модулей время, затраченное системой на контроль и распараллеливания процессов, будет возрастать и, в зависимости от конкретной реализации среды исполнения [5], может оказывать существенное влияние на работу системы в целом. Не углубляясь в методику расчета и теоретическое обоснование этой величины, учтем ее влияние на систему следующим образом:

$$t'_{\max} = t_{\max} + \Delta t, \quad (3)$$

где $t_{\max}$ – время работы мультиверсионного участка ГЕРТ-сети; Δt – время, затраченное системой на межинтерфейсное взаимодействие.

Введем следующие обозначения:

$M(X)$ – математическое ожидание времени работы мультиверсионного блока, модули которого выполняются параллельно;

x_i – время работы i -го модуля (математическое ожидание времени работы мультиверсионного модуля i);

n – количество мультиверсионных модулей в блоке.

Тогда математическим ожиданием времени работы мультиверсионного блока предлагается считать максимальное математическое ожидание среди всех n мультиверсионных модулей:

$$M(X) = \max_{1 \leq i \leq n} (x_i). \quad (4)$$

Введем дополнительные обозначения:

$D(X)$ – дисперсия времени работы мультиверсионного блока, модули которого выполняются параллельно;

$\sigma(X)$ – стандартное отклонение или среднеквадратическое отклонение времени работы мультиверсионного блока ($\sigma(X) = \sqrt{D(X)}$).

Стандартное отклонение времени работы мультиверсионного блока предлагается определять следующим образом.

Шаг 1. Определить максимальную величину $M(x_i) + \sigma(x_i)$ среди всех n блоков (максимально возможное отклонение).

Шаг 2. Определить максимальное математическое ожидание среди всех n мультиверсионных модулей.

Шаг 3. Разность п. 1 и п. 2 и будет стандартным отклонением времени работы мультиверсионного блока.

$$\sigma(X) = \max_{1 \leq i \leq n} (M(x_i) + \sigma(x_i)) - \max_{1 \leq i \leq n} (x_i), \quad (5)$$

$$D(X) = \sigma(X)^2. \quad (6)$$

2. Применение методологии мультиверсий в виде базовых ГЕРТ-сетевых моделей

N -версионное программирование. N -версионное программирование – это мультиверсионная методика, в которой все версии разработаны в соответствии с идентичными основными требованиями, а решение о правильности вывода основано на сравнении всех выводов [6] (рис. 3, 4).

Использование универсального алгоритма выбора решения (обычно голосования) для выбора правильного вывода – фундаментальное различие этого подхода и подхода с блоком восстановления, который требует зависимого от приложения приемочного теста. Так как все версии построены в соответствии с идентичными требованиями, то использование N -версионного программирования требует значительно больших затрат при разработке, но сложность, т. е. трудность разработки не обязательно будет намного большей, чем сложность формирования одной версии.

Проектирование выбирающего алгоритма может быть усложнено необходимостью реализовать алгоритм неточного голосования [1]. Многие исследования направлены на разработку методологий, которые увеличи-

вают вероятность достижения эффективного разнообразия в конечном продукте. Фактическое выполнение версий может быть последовательным или параллельным. Последовательное выполнение может потребовать использования контрольных точек, чтобы перезагрузить состояние перед выполнением дополнительной версии.

Блоки восстановления. Методика блоков восстановления комбинирует основные идеи метода контрольных точек и рестарта для мультиверсионных компонентов программного обеспечения таким образом, что различные версии используются только после того, как обнаруживается ошибка [7] (рис. 5, 6).

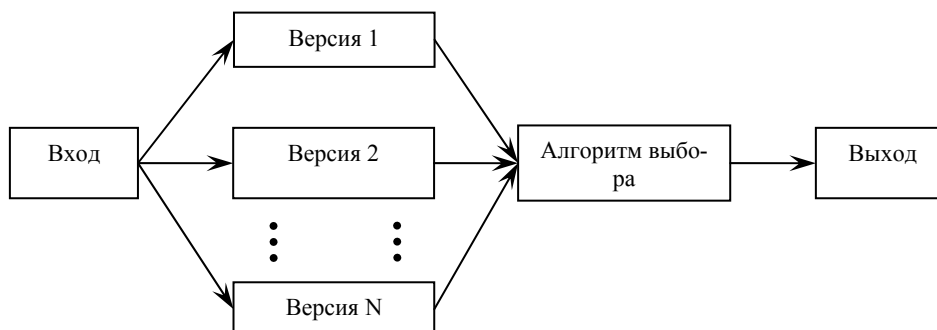


Рис. 3. Модель N -версионного программирования

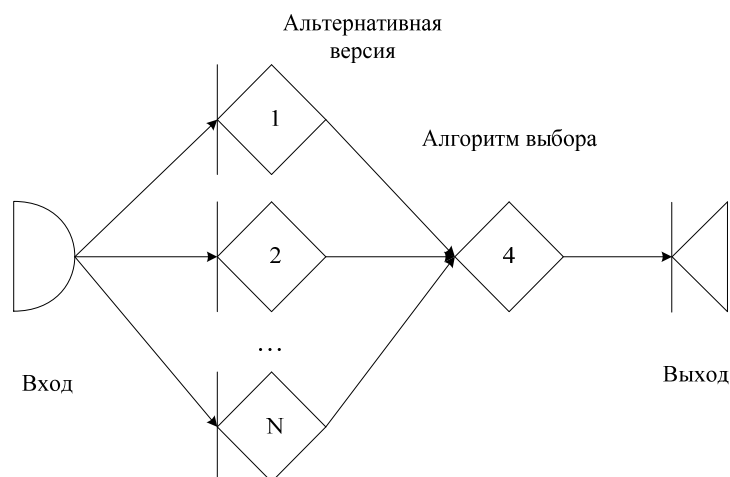


Рис. 4. Модель N -версионного программирования в виде ГЕРТ-сети

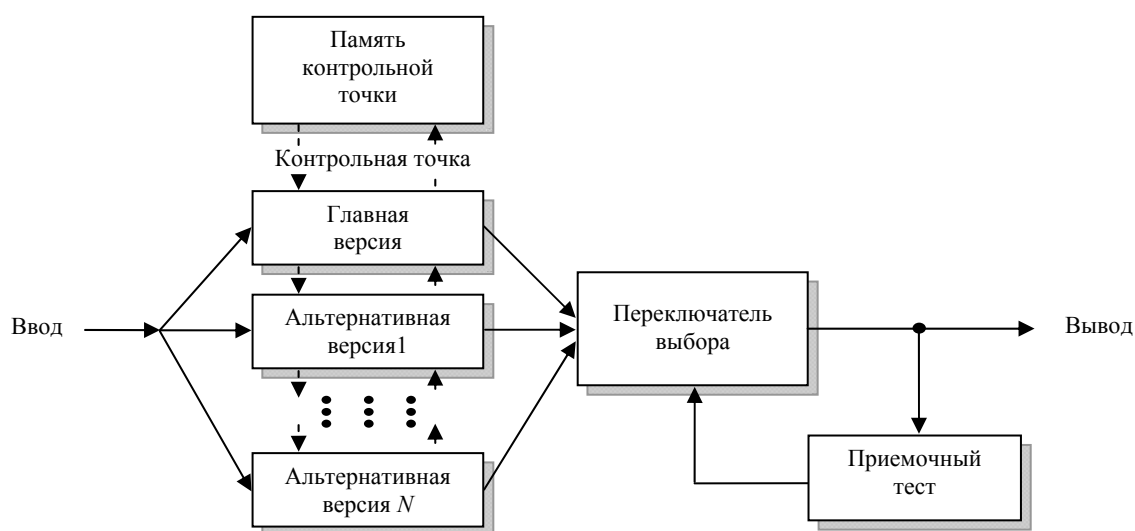


Рис. 5. Модель блока восстановления

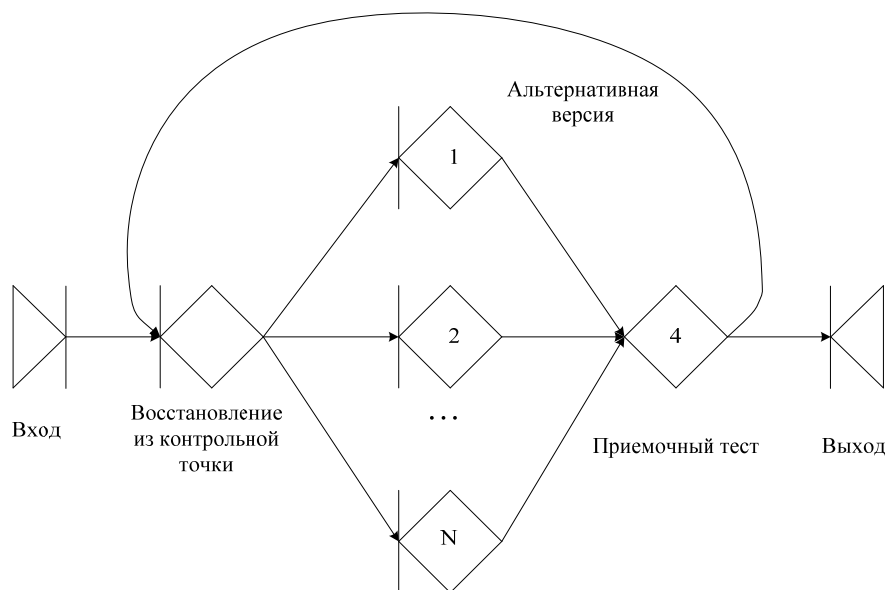


Рис. 6. Модель блока восстановления в виде ГЕРТ-сети

Контрольные точки определяются перед исполнением версий. Контрольные точки необходимы, чтобы восстановить состояние после того, как версия произведет сбой и не сможет обеспечить корректную начальную точку для следующего компонента. Приемочный тест не должен быть только выходным тестом и может осуществляться различными встроенными проверками, чтобы увеличить эффективность обнаружения ошибок. Также, из-за того, что первичная версия будет успешно выполняться в большинстве случаев, альтернативы могут быть разработаны с более низкой производительностью и качеством (в некотором смысле) (например, вычисляя значения с меньшей точностью). Подобно методу разнообразия данных, вывод альтернативных версий может быть разработан таким образом, чтобы быть эквивалентным первичному (с определением эквивалентности, зависящей от приложения).

Фактическое выполнение множественных версий может быть последовательным или параллельным в зависимости от вычислительных мощностей и требований производительности. Если все альтернативы выдали сбой, компонент должен инициировать исключение, чтобы сообщить остальной части системы об отказе завершения его функции.

Следует отметить, что такое возникновение отказа не подразумевает постоянного отказа компонента и он может быть повторно использован после изменений его состояния или ввода. Возможность совпадения отказов является источником больших дискуссий относительно всей технологии отказоустойчивого мультиверсионного программного обеспечения [6].

***N*-версионное программирование с самоконтролем.** *N*-версионное программирование с самоконтролем – это мультиверсионное программное обеспечение, комбинирующее методологию блока восстановления и *N*-версионное программирование. *N*-вер-

сионное программирование с самоконтролем использует приемочные тесты (рис. 7, 8). В данном случае версии и приемочные тесты разработаны независимо от общих требований. Здесь используются отдельные приемочные тесты на каждую версию, что является основным различием этой модели от методологии с блоком восстановления. Подобно методологии с блоком восстановления, выполнение версий и их испытание может быть сделано последовательно или параллельно, но вывод принят от версии, которая выбрана голосованием и которая прошла приемочный тест. Последовательное выполнение требует использования контрольных точек, а параллельное выполнение требует использования алгоритмов синхронизации ввода и состояний.

***N*-версионное программирование с самоконтролем, использующее сравнение с самоконтролем,** использующее сравнение для обнаружения ошибок (рис. 9). Подобно *N*-версионному программированию, эта модель имеет преимущество использования алгоритма выбора решения при выборе правильного вывода, который зависит от приложения (рис. 9, 10). Этот вариант программирования имеет теоретическую уязвимость при столкновении с ситуациями, где множественные пары передают различные данные для сравнения. Этот случай должен быть рассмотрен, и соответствующий решающий подход должен быть выбран на стадии проектирования [1].

Блоки восстановления с согласованием. Блоки восстановления с согласованием (рис. 11, 12) – это подход, комбинирующий *N*-версионное программирование и метод блоков восстановления, для повышения надежности по сравнению с использованием только одного из подходов. Согласно [6], приемочные тесты в блоках восстановления страдают из-за недостатка руководящих принципов для их разработки и общей склонности к ошибкам проектирования из-за трудности создания эффективных тестов.

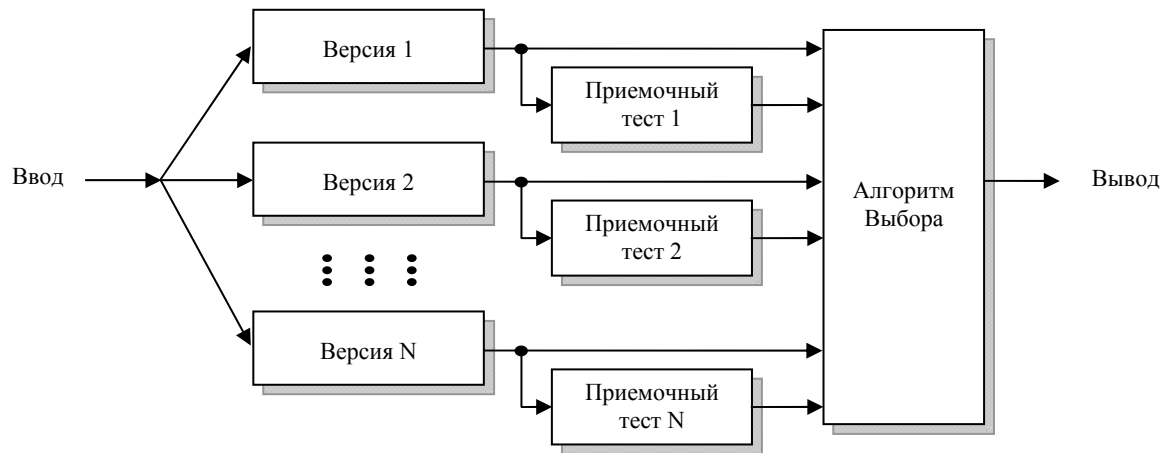


Рис. 7. Модель N -версионного программирования с самоконтролем

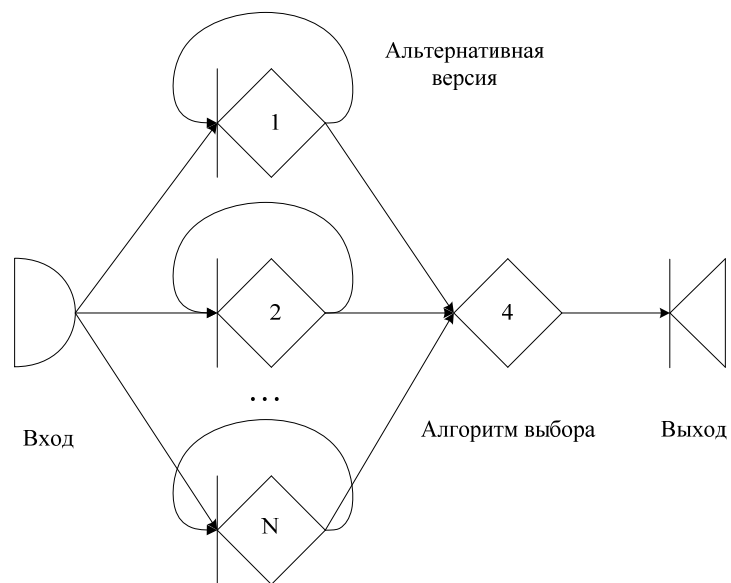


Рис. 8. Модель N -версионного программирования с самоконтролем в виде ГЕРТ-сети

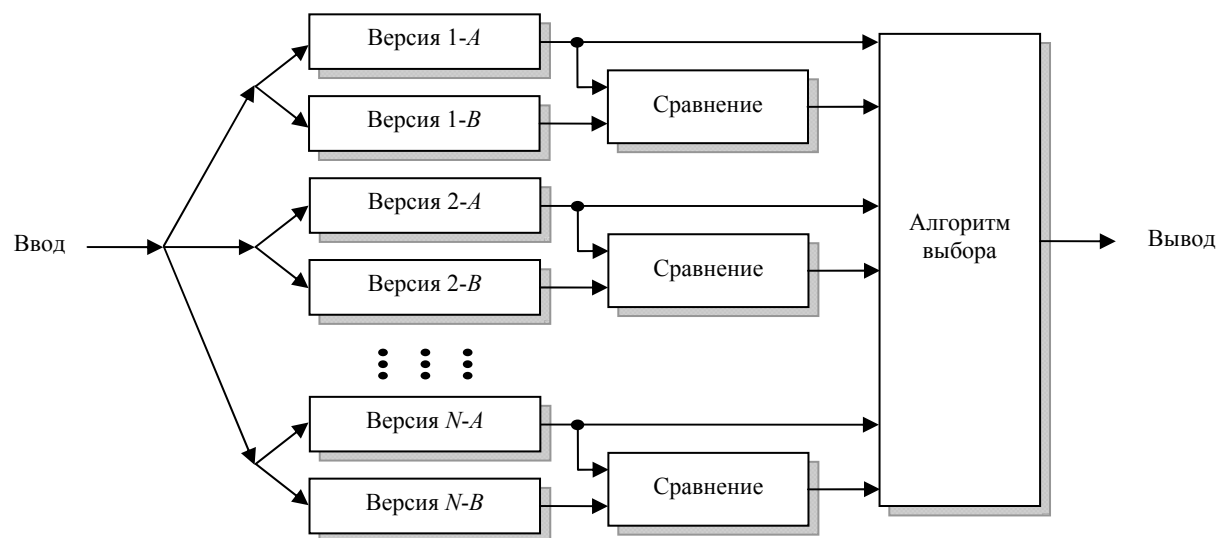


Рис. 9. Модель N -версионного программирования с самоконтролем, использующая сравнение

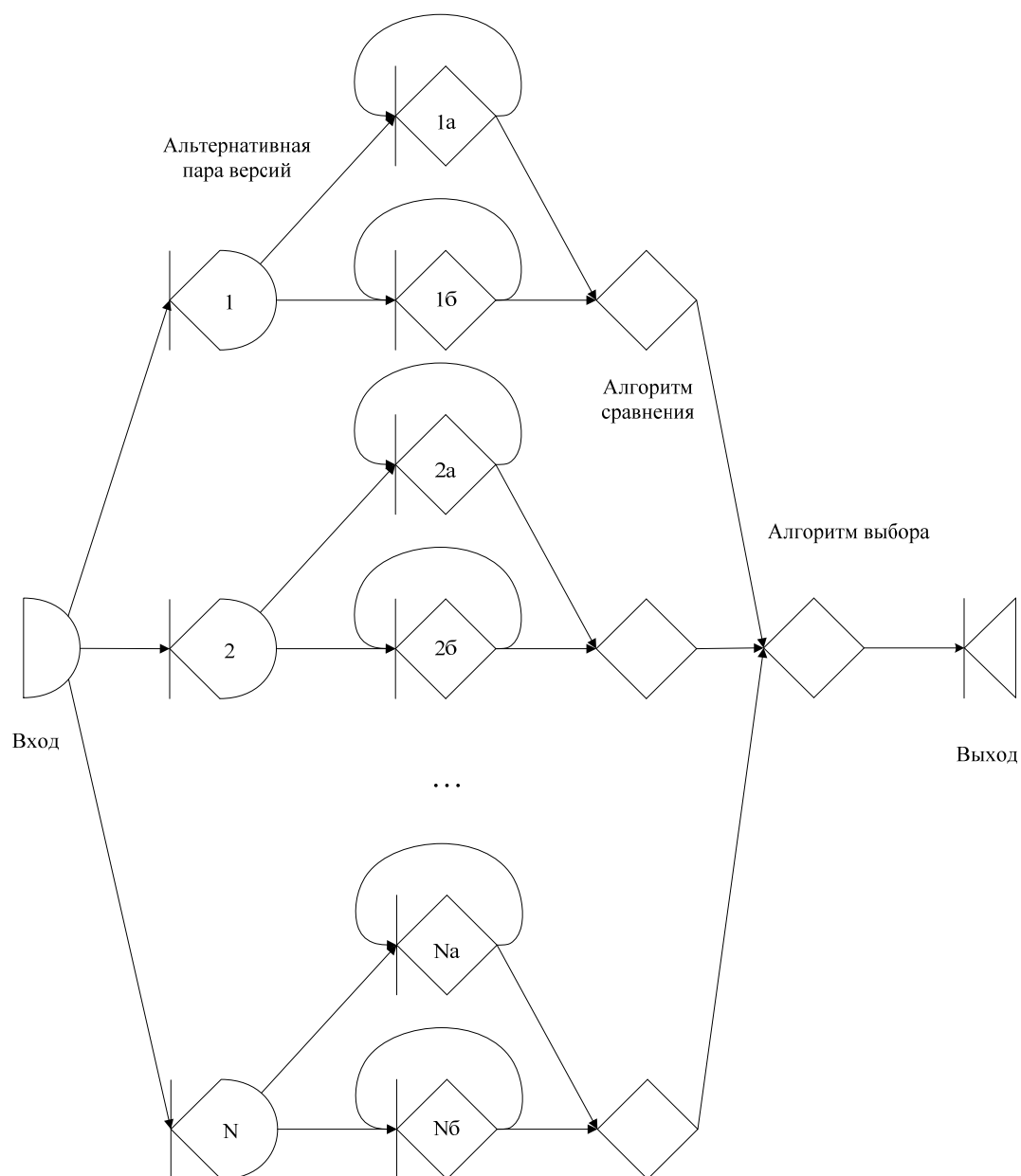


Рис. 10. Модель N -версионного программирования с самоконтролем, использующая сравнение в виде ГЕРТ-сети

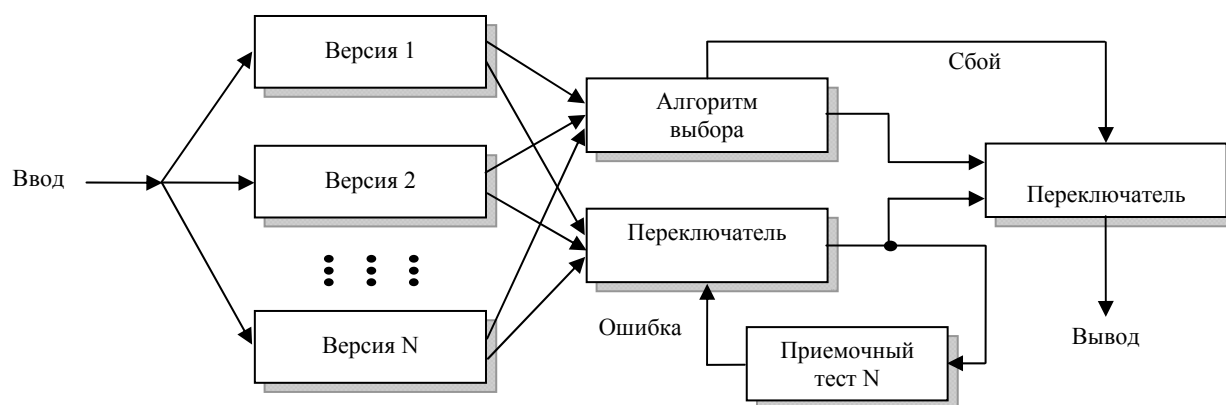


Рис. 11. Модель блока восстановления с согласованием

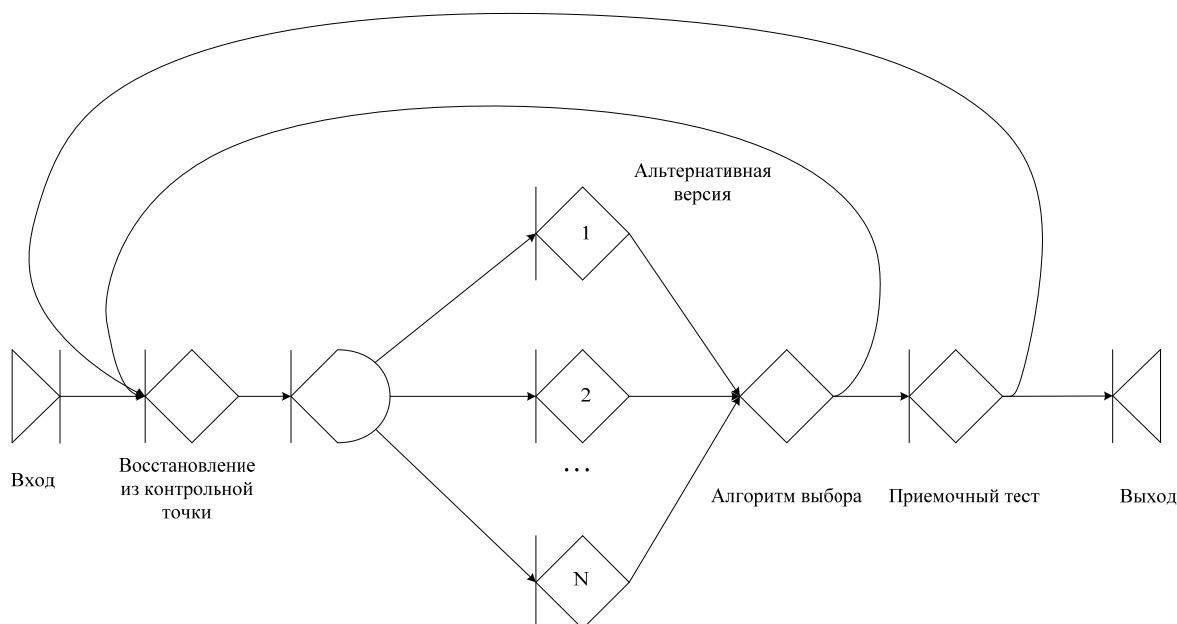


Рис. 12. Модель блока восстановления с согласованием в виде ГЕРТ-сети

Использование голосования, как в N -версионном программировании, не может быть применено во всех ситуациях, особенно когда возможны правильные множественные выводы. В этом случае голосование объявило бы об отказе при выборе соответствующего вывода. Блоки восстановления с согласованием используют алгоритм выбора решения, подобный N -версионному программированию, как первый уровень решения. Если этот первый уровень объявляет отказ, то используется второй уровень приемочного испытания, подобный тому, который был использован в методе блоков восстановления. Несмотря на очевидность гораздо более высокой сложности такого комбинированного подхода реализации, чем любого другого индивидуального метода, сравнение модели надежности указывает на то, что этот комбинированный подход имеет высокий потенциал для создания более надежного программного обеспечения. Использование слова «потенциал» важно здесь потому, что добавленная сложность реализации могла бы работать против проекта и приводить к менее надежной системе.

Предложенные способы реализации методологии мультиверсий в виде базовых ГЕРТ-сетевых моделей позволяют создавать ГЕРТ-сети, описывающие соответствующий вид мультиверсионных архитектур программного обеспечения, что делает возможным получение их вероятностно-временных характеристик функционирования. Применение необходимого и достаточного условия функционирования мультиверсионного программного модуля позволяет использовать эквивалентные преобразования и получать ГЕРТ-сети, которые могут быть рассчитаны с использованием имеющегося математического аппарата. Это существенно расширяет сферу применения ГЕРТ- сетевого моделирования для расчета вероятностно-временных

характеристик мультиверсионных архитектур программного обеспечения, которые известны сейчас и могут появиться в будущем.

Библиографические ссылки

1. Ковалев И. В., Котенок А. В. К проблеме выбора алгоритма принятия решения в мультиверсионных системах // Информ. технологии. 2006. № 9. С. 39–44.
2. Царев Р. Ю. Поддержка принятия решений при мультиверсионном формировании высоконадежного программного обеспечения // Успехи современного естествознания. 2011. № 1. С. 82–83.
3. Ковалёв П. В. ГЕРТ-сетевой анализ мультиверсионных архитектур программного обеспечения // Успехи современного естествознания. 2009. № 9. С. 161–164.
4. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей. М.: Мир, 1984.
5. ГЕРТ-сетевой анализ мультиверсионных программных архитектур информационно-управляющих систем / И. В. Ковалев, П. В. Ковалев, А. И. Кудинкин, Ю. А. Нургалеева // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 8. С. 1–7.
6. Algirdas Avizienis, The Methodology of N-Version Programming. N. Y.: John Wiley & Sons, 1995.
7. Ковалёв П. В., Лайков А. Н., Гриценко С. Н. Определение надежности мультиверсионного программного обеспечения с использованием методов анализа сетей // Вестник СибГАУ. 2009. № 1(22). Ч. 2. С. 55–60.

© Ковалев И. В., Зеленков П. В., Сарамуд М. В., Сидорова Г. А., Брезицкая В. В., 2013

УДК 62-506.1

СИСТЕМА ПОИСКА, АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ МУЛЬТИЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ, ИНТЕГРИРОВАННАЯ С ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВЫМИ СИСТЕМАМИ*

И. В. Ковалев¹, К. В. Полянский², П. В. Зеленков¹, В. В. Брезицкая¹, Г. А. Сидорова¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: kleniks@yandex.ru

²Сибирский федеральный университет
Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: kostyan785@mail.ru

Рассмотрены современные системы машинного перевода и предложена система поиска, анализа и обработки мультилингвистических текстов, интегрированная с информационно-поисковыми системами сети Интернет. Приведена структура системы, определены задачи, которые необходимо решить при ее разработке.

Ключевые слова: машинный перевод, обработка текста, мультилингвистика, информационно-поисковые системы.

SYSTEM OF SEARCH, ANALYSIS AND PROCESSING OF MULTILINGUISTIC TEXTS, INTEGRATED WITH DATA RETRIEVAL SYSTEMS

I. V. Kovalev¹, K. V. Polyanskiy², P. V. Zelenkov¹, V. V. Brezitskaya¹, G. A. Sidorova¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: kleniks@yandex.ru

²Siberian Federal University
26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: kostyan785@mail.ru

Modern machine translation systems are considered, problems of the given systems are revealed, possible decisions are offered. The comparative analysis of six most popular systems is made, conclusions are drawn, on quality of their translation. The system of search, analysis and processing of multilinguistic texts, integrated with data retrieval systems of network Internet, is considered. The structure of the given system is presented, problems to be solved for its developing, are defined.

Keywords: machine translation, text processing, multilinguistics, information retrieval systems.

Современные системы машинного перевода (СМП) используют один из двух подходов: память переводов и методы машинного перевода. Качество перевода в таких системах отличается, и на сегодняшний день не существует системы машинного перевода, осуществляющей перевод безошибочно. Задача минимизации ошибок систем машинного перевода, а следовательно улучшения качества перевода, является главной. Память переводов и методы машинного перевода несовершенны и приводят к ошибкам. Лучше человека на данный момент переводить не может ни одна система. Поэтому чем больше вовлеченность человека в процесс перевода, тем лучше и качество переведенного текста.

Однако несмотря на это качество перевода современных СМП возрастает как за счет применения моделей и методов искусственного интеллекта, так и за счет использования сервисов сети Интернет. Рассмотрим наиболее актуальные проблемы, с которыми сталкиваются СМП сегодня.

Привязанность к переводческим парам. Большинство современных СМП построено по принципу переводческих пар (рис. 1). Под переводческой парой следует

понимать совокупность правил перевода, переводящей грамматики, контекстологических, терминологических, фразеологических и других словарей, а также иных правил и алгоритмов, отвечающих за перевод в направлении данной пары «исходный язык – целевой язык» (ИЯ–ЦЯ).

Подход переводческих пар обусловлен возможностью более узкого описания поведения языка в рамках конкретного направления перевода. Таким образом, каждая переводческая пара – это подробное описание перевода «ИЯ–ЦЯ». Наличие большого количества переводческих пар придает СМП громоздкость, обусловленную большим объемом информации и присутствием избыточности в описаниях. Добавление новой языковой пары требует кропотливой работы и сильно усложняет систему. При возникновении ошибки в грамматике одного из языков необходимо выполнить редактирование в грамматиках языков, составляющих с ним переводческие пары. Наряду с неоспоримыми достоинствами подхода переводческих пар приведенные недостатки являются существенными и создают ряд серьезных проблем.

Решение данных проблем может быть следующим.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, ГК № 16.740.11.0750.

Внедрение систем Interlingua. Модель СМП с переводческими парами можно представить в виде набора двухзвенных отношений «ИЯ–ЦЯ», где каждое отношение является автономным и не зависит от изменений, вносимых в смежные отношения (рис. 1, 2). Модель СМП, построенных по типу Interlingua, представляет собой архитектуру типа «Звезда» с набором трехзвенных отношений «ИЯ–ПЯ–ЦЯ». Звено ПЯ (промежуточный язык) располагается в центре звезды, в то время как остальные языки – на периферии. В качестве ПЯ может выступать любой язык (обычно английский), для которого строятся переводческие пары «ИЯ–ПЯ» и «ПЯ–ЦЯ», как показано на рис. 1, б.

Из рис. 1 видно, что для каждого перевода с ИЯ на ЦЯ в модели «Переводческие пары» задействовано одно отношение «ИЯ–ЦЯ», в то время как модель «Звезда» использует два отношения «ИЯ–ПЯ» и «ПЯ–ЦЯ». Избыточность отношений для одного перевода в модели «Звезда» компенсируется минимальным количеством всех отношений в случае многих языков. Так, если СМП делает перевод на N языков, то количество отношений в схеме «Переводческие пары» равно $N(N - 1)$, а количество отношений в схеме «Звезда» определяется как $2N - 2$. При большом значении N схема «Звезда» становится менее громоздкой и более простой в процессе разработки СМП, что видно из графика на рис. 2.

За счет наличия ПЯ подход Interlingua также обеспечивает единообразие при переводе на несколько

ЦЯ. Это весьма востребованно в последнее время при составлении многоязычной технической документации, а также и руководств пользователя. Подход Interlingua решает проблему переводческих пар.

Использование концептно-ориентированной модели СМП. Еще одной альтернативой использования переводческих пар является концептно-ориентированная модель СМП. Данная модель также построена по типу «Звезда». Однако звено ПЯ, в отличие от подхода Interlingua составляют не ПЯ-термы (термы промежуточного языка), а концепты. Концептом называется не зависящее от конкретного языка понятие, соответствующее реальной или абстрактной сущности, свойству, действию либо иному элементу, отражающему связь между другими понятиями. Концепты берутся из специализированного словаря, на основе которого строится граф концептов. Граф концептов является базой в звене ПЯ концептно-ориентированных СМП. Для построения графа концептов в современных СМП используется язык UNL (The Universal Networking Language) – искусственный семантико-синтаксический язык, не зависящий от какого-либо естественного языка. Наряду с тем что концептно-ориентированные модели решают проблему переводческих пар, они обладают мощным эвристическим инструментом. На основе графа концептов производится довольно качественный семантический анализ, что играет большую роль в осуществлении осмысленного перевода [1].

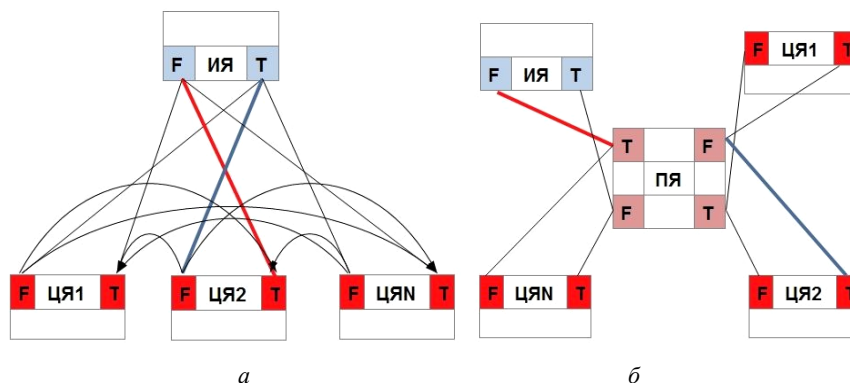


Рис. 1. Модели «Переводческие пары» (а) и «Звезда» (б)

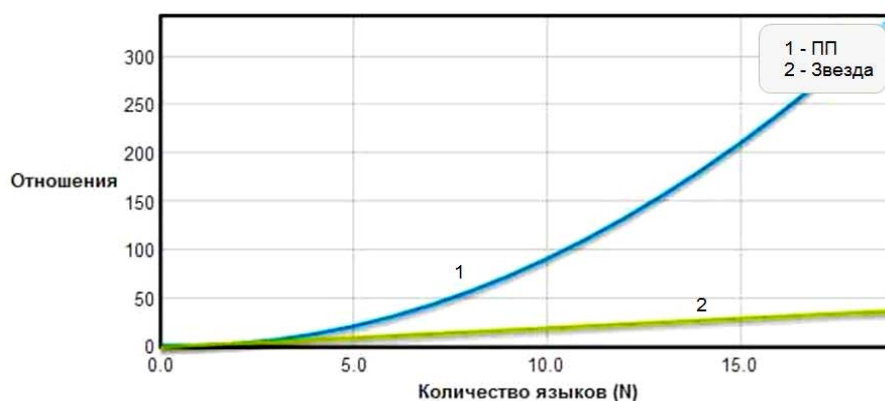


Рис. 2. График зависимости количества отношений от количества языков в моделях «Переводческие пары» (1) и «Звезда» (2)

Отсутствие качественных контекстуальных и семантических анализаторов. Качественный перевод на лексическом и синтаксическом уровне требует учета семантической составляющей текста. Для этого необходим механизм нахождения вариантов перевода на ЦЯ, наилучшим образом подходящих по смыслу, что невозможно сделать без учета контекста. Однако даже для самых современных СМП не удалось разработать более или менее качественных контекстуальных анализаторов. Этим и объясняется наличие в большинстве СМП проблемы, описанной философом Бар-Хиллелом.

Бар-Хиллел выступил с утверждением о принципиальной невозможности осуществления высококачественного полностью автоматического машинного перевода. В качестве примера была приведена проблема отыскания правильного перевода для слова *pen* в следующем тексте: *John was looking for his toy box. Finally he found it. The box was in the pen. John was very happy. Pen* в данном случае должно переводиться не как «ручка», «перо» (инструмент для письма) или «загон», а как «детский манеж» (*play-pen*). Выбор того или иного перевода в подобном случае обусловлен знанием внеязыковой действительности, а это знание слишком обширно и разнообразно, чтобы вводить его в компьютер. Таким образом, Бар-Хиллел утверждал, что, не зная контекста, СМП никогда не построит осознанно правильного предложения. Это актуальная и очень острая проблема. Результаты переводов фразы Бар-Хиллела экспертом и современными СМП представлены ниже.

– перевод эксперта: Джон искал свою игрушечную коробку. Наконец он ее нашел. Коробка была в манеже. Джон был очень счастлив;

– Яндекс. Перевод (URL: <http://translate.yandex.ru/>): Джон смотрел на его коробку. Наконец он нашел его. Коробка была в загоне. Джон был очень счастлив;

– PROMT. Translate (URL: <http://translate.ru/>): Джон искал свою игрушечную коробку. Наконец он нашел это. Коробка была в ручке. Джон был очень счастлив;

– Google Переводчик (URL: <http://translate.google.com/?>): Джон искал его игрушки коробке. Наконец,

он нашел ее. Коробка была в загоне. Джон был очень счастлив;

– <META> Переводчик (URL: <http://translate.meta.ua/>): Джон искал его игрушечную коробку. Наконец он нашел это. Коробка была в ручке. Джон был очень счастлив;

– SYSTRANet (URL: <http://www.systranet.com/translate>): Джон искало его коробка игрушки. Окончательно он нашел он. Коробка находилась в ручке. Джон было очень счастливо;

– Bing Translator (URL: <http://microsofttranslator.com/>): Джон искал его игрушек окна. Наконец он нашел его. Поле был в перо. Джон был очень счастлив;

– Babylon 9 Онлайн (URL: <http://perevodchik.babylon.com/>): Джон изучает его игрушки ввода. Наконец, он счел. В графе было в ручку. Джон был очень рад.

Исходя из этих результатов можно сделать следующие выводы:

– качество перевода в приведенных СМП отличается;

– нет СМП, которые бы опровергли утверждение Бар-Хиллела при переводе третьего предложения;

– различные СМП неодинаково ведут себя при переводе одних и тех же предложений, причем ошибки перевода порой не зависят от сложности предложений. Так, например, СМП «Google Переводчик» не справилась с переводом несложного предложения *John was looking for his toy box*, переведя его как «Джон искал его игрушки коробке», в то время как менее популярная СМП «<META> Переводчик» перевела это предложение почти правильно: «Джон искал его игрушечную коробку». Такое явление можно объяснить разными подходами, используемыми в различных СМП при переводе.

То, насколько качественно рассматриваемые СМП выполнили перевод предложений Бар-Хиллела, показано на рис. 3. В качестве критерия оценки качества перевода было взято процентное соотношение соответствия термов для четырех рассматриваемых ЦЯ-предложений каждой СМП с термами четырех аналогичных ЦЯ-предложений, переведенных экспертом-переводчиком.

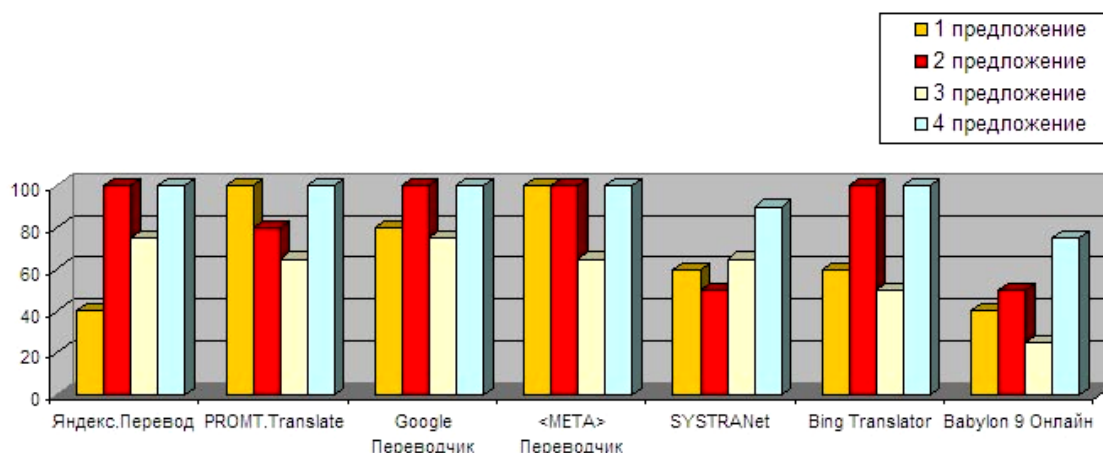


Рис. 3. Гистограмма соответствия переводов экспертному варианту в предложениях Бар-Хиллела

Усредняя результаты, приведенные на рис. 3, по всем СМП, получим следующие показатели качества перевода предложений, приведенные в таблице.

№ п/п	ИЯ-предложение	Качество перевода в среднем, %
1	John was looking for his toy box	68,57
2	Finally he found it	82,86
3	The box was in the pen	60,00
4	John was very happy	95,00

Из таблицы видно, что наиболее качественным для всех СМП является перевод второго и четвертого предложений. Данные предложения – простые по своей структуре, состоят из группы подлежащего и сказуемого и не содержат сложных речевых оборотов. Перевод этих предложений не представляется сложным. Ухудшение качества перевода для первого предложения обусловлено наличием словосочетания *toy box*, перевод которого лексически дифференцирован по типу переводящей СМП. Такое явление связано с отличиями в терминологической базе используемых СМП словарей либо с отличиями в предпочтениях переводящих алгоритмов, которые выбирают конечный вариант перевода из многих возможных. Результаты перевода третьего предложения являются плохими. Несмотря на то что сходство с экспертным переводом для этого предложения составляет в среднем 60 %, у таких СМП, как *Bing Translator* и *Babylon 9* Онлайн, показатель качества не превышает 50 %. В целом ни одна СМП не перевела терм *pen* в соответствии с требованиями контекста. Это, в свою очередь, свидетельствует о неудовлетворительном произведении контекстуального анализа текста и семантическом анализе термов ИЯ-предложения. На сегодня это острая проблема для всех СМП.

Статичность информационных баз. В современных СМП используются такие Информационные базы (ИБ) как словари, базы данных, базы знаний.

Словарь – один из наиболее популярных типов ИБ. Словарями в СМП называются двунаправленные упорядоченные наборы термов или их сочетаний, в которых каждому терму ИЯ ставится в соответствие один или несколько термов ЦЯ. Помимо двуязычных словарей, получивших широкое распространение, существуют и мультязычные словари [2]. В таких словарях ИЯ-терму могут быть сопоставлены термы нескольких ЦЯ. В случае мультязычных словарей между термами образуются множественные взаимосвязи, поэтому построение таких словарей – задача сложная, требующая больших временных затрат. Составленный однажды, словарь становится статичной ИБ, претерпевающей незначительные корректировки в длительной временной перспективе. Но поскольку любой язык – сущность, динамически развивающаяся во времени, то изменения, происходящие в языке, должны находить свое отражение и в словаре [3].

Проблема статичности ИБ может быть решена за счет обновления словаря через информационно-поисковые системы (ИПС) сети Интернет. Получение синтаксически корректного, но неточного с лексиче-

ской точки зрения перевода часто вызвано устареванием термов, составляющих ИБ. В этом случае СМП необходима синхронизация обновлений ИБ с каким-либо источником лингвистической информации. Интернет является подходящим для этой цели средством, ведь терминологическая база глобальной сети постоянно обновляется за счет развития языка составляющих ее статей. Процесс обновления ИБ через сеть Интернет осуществляется посредством ИПС путем выполнения последней информационно-поисковых запросов. Результатом таких запросов являются наборы термов, потенциально пригодных для обновления ИБ. После проверки данных термов на лексическую и морфологическую корректность часть из них может быть предложена к добавлению. Взаимодействие СМП с ИПС сети Интернет решает проблему статичности ИБ. Это приобретает наибольшую актуальность в случае громоздких мультязычных словарей [4].

Итак, очевидно, что гипертекстовые ресурсы сети Интернет являются самым большим языковым корпусом и содержат большой объем текстовой информации. Более того, гипертекст Интернета полностью создан человеком, за счет чего гипертекст обладает в среднем высоким процентом грамматической правильности. Следовательно, использование данного корпуса в качестве памяти перевода позволит минимизировать ошибки перевода. Для извлечения из сети Интернет лингвистической информации, необходимой при переводе, предлагается использовать информационно-поисковые системы. Полученная система машинного перевода должна принадлежать классу IP-СМП.

Структура IP-СМП. IP-СМП – это система машинного перевода, использующая ИПС сети Интернет для осуществления машинного перевода. IP-СМП обладает рядом свойств, позволяющих эффективно решать поставленные задачи, и является веб-приложением. Распределенность IP-СМП через сеть Интернет позволяет решить такие проблемы, как встраиваемость в службы, сервисы и приложения, доступность онлайн, обеспечение обновления информационной базы.

IP-СМП функционирует следующим образом. Поступивший на вход системы текст на исходном языке должен быть в первую очередь тщательно проанализирован. Целью анализа является формирование на выходе характерных термов, то есть термов, наиболее удачно описывающих предметную область ИЯ-текста. На основе этих термов генерируется и отправляется запрос к ИПС для получения коллекции релевантных документов на целевом языке. Если в классических МТ-системах на стадии поиска цепочек перевода происходит обращение к БД, то IP-СМП обращается за информацией к ИПС сети Интернет. Из полученных от ИПС текстов на ЦЯ будет синтезирован ЦЯ-текст, являющийся переводом данного ИЯ-текста [5].

К IP-СМП предъявляются следующие требования:

- интеграция с ИПС сети Интернет;
- реализация памяти переводов;
- веб-интерфейс.

В соответствии с [6] и указанными требованиями архитектура IP-СМП будет иметь вид, представленный на рис. 4.

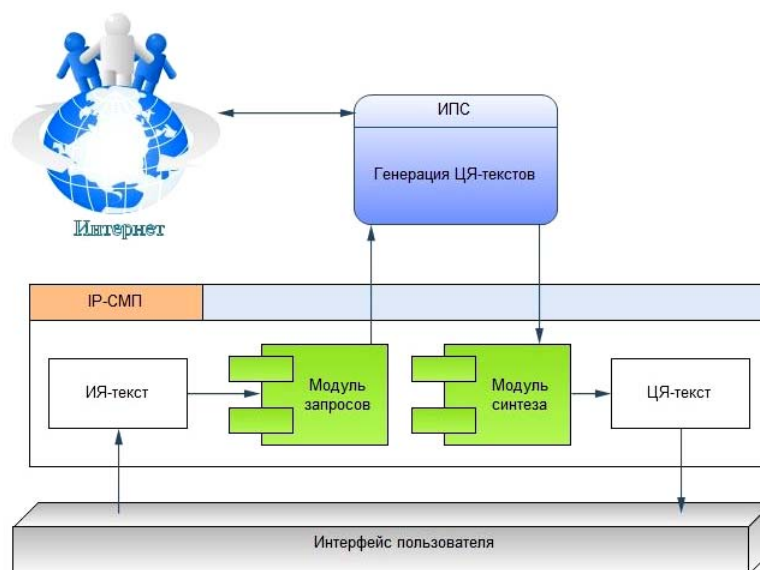


Рис. 4. Архитектура IP-СМП

Основными блоками IP-СМП являются:

- интерфейс пользователя;
- модуль запросов;
- модуль синтеза.

Их взаимодействие осуществляется следующим образом. Полученный через интерфейс пользователя ИЯ-текст подвергается анализу, для чего используются частотные алгоритмы взвешивания термов. Результат анализа поступает на вход модуля запросов в виде характерных термов. Данные термы предварительно переводятся на ЦЯ, и на их основе строится строка поискового запроса, с которой модуль обращается к ИПС. ИПС в ответ на запрос возвращает коллекцию ЦЯ-текстов, являющихся релевантными данному ИЯ-тексту. Для ИЯ и ЦЯ-текстов строится скрытая марковская цепь (СМЦ) перевода. Задача модуля синтеза состоит в генерации перевода на ЦЯ на основе построенной СМЦ. Результат работы модуля поступает в интерфейс пользователя в виде окончательного перевода на ЦЯ [7].

Разработка IP-СМП затрагивает следующие вопросы:

- выбор алгоритмов частотного взвешивания термов;
- взаимодействие системы с ИПС;
- оптимизацию языка поисковых запросов применительно к целям IP-СМП;
- построение СМЦ перевода для ИЯ/ЦЯ-текстов;
- организация памяти переводов;
- оценка качества перевода.

Итак, рассмотрев шесть наиболее популярных систем машинного перевода, можно сделать вывод о том, что все переводы имеют отклонение от экспертного, взятого за эталон. Наличие проблемы Бар-Хиллела наблюдается во всех рассматриваемых СМП. В результате анализа наиболее актуальных проблем современного перевода предложено возможное решение в виде системы поиска, анализа и обработки мультилингвистиче-

ских текстов, интегрированной с информационно-поисковыми системами сети Интернет, приведена структура данной системы, определены задачи, которые необходимо решить при ее разработке.

Библиографические ссылки

1. Марчук Ю. Н. Проблемы машинного перевода. М.: Наука, 1983. С. 12–15.
2. Ковалев И. В., Усачев А. В. Мультилингвистический метод изучения иностранной терминологической лексики на базе мнемотехнического подхода // Соц.-психол. пробл. развития личности: материалы I Всерос. науч. интернет-конф. Вып. 4. Тамбов: ТГУ, 2001. С. 58.
3. Ковалев И. В., Карасева М. В., Лесков В. О. Информационно-терминологический базис как совокупность лексически связанных компонентов // Вестник СибГАУ. 2009. № 1 (22). С. 54–56.
4. Kovalev I., Kovaleva T., Susdaleva E. Effective Information Training Technology Based on the Learner's Memory State Model. Modelling, Measurement and Control D. 2000. T. 21, № 3–4. С. 11–26.
5. Карасева М. В., Ковалев И. В., Суздалева Е. А. Модель архитектуры мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии // Новые информационные технологии в университетском образовании: тез. междунар. науч.-метод. конф. Кемерово, 2002. С. 192–195.
6. Ковалев И. В. Системная архитектура мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии и современная структурная методология // Дистанц. и виртуал. обучение. 2002. № 3. С. 6–12.
7. Нелюбин Л. Л. Компьютерная лингвистика и машинный перевод. М., 1991. С. 68–71.

© Ковалев И. В., Полянский К. В., Зеленков П. В., Брезницкая В. В., Сидорова Г. А., 2013

УДК 621.892

ПРИБОР ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТРУЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ И МАСЕЛ

Б. И. Ковальский, О. Н. Петров, В. Г. Шрам, А. Н. Сокольников, А. А. Игнатьев

Сибирский федеральный университет
Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: Labsm@mail.ru*Проведен анализ устройств для испытания смазочных масел на противоизносные свойства, предложено устройство для испытания трущихся материалов и масел.**Ключевые слова: машина трения, противоизносные свойства, диаметр пятна износа, смазывающая способность.***DEVICE FOR TEST OF RUBBING MATERIALS AND OILS**

B. I. Kowalski, O. N. Petrov, V. G. Shram, A. N. Sokolnikov, A. A. Ignatyev

Siberian Federal University
26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: Labsm@mail.ru*The literary analysis of devices for testing lubricants for anti-wear properties is presented, and device for testing rubbing materials and oils is offered.**Keywords: machine friction, anti-wear properties, Wear Scar Diameter, lubricity.*

При подборе и оценке противоизносных свойств, смазывающей способности масел, температурной стойкости и других эксплуатационных показателей различных смазок необходимо использовать устройства для испытания трущихся материалов и масел.

Как показывает анализ, на первой стадии рационального цикла испытаний смазочных масел в лабораторных условиях предпочтение отдают четырехшариковой машине трения (ЧШМ) ввиду простоты и высокой воспроизводимости эксперимента [1]. Данная методика стандартизирована и имеет широкое применение (ГОСТ 9490–75, ASTM D 2783, DIN 51350). На рис. 1 представлена схема рабочего узла ЧШМ. Ко дну кюветы 1 прикреплены три равнорасположенных по окружности шарика 2. Сверху на них опирается прикрепленный к пуансону 4 шарик 3, который прижат к шарикам 2 с заданным усилием. Кювета 6 заполняется испытуемым маслом. Шарик 3 через оправку 4 приводится во вращение и скользит по закрепленным шарикам. Кювета 6 расположена на подшипниковой опоре 7, но удерживается от поворота тягой 8, соединенной с динамометром.

Динамометр регистрирует момент трения, величина которого записывается на ленте самописца. В тот момент, когда смазывающая способность масла исчерпывается, происходит схватывание верхнего шарика с нижними, момент трения резко увеличивается, что видно по записываемой кривой диаграммы, и испытание прекращается.

Время испытания используется как мера оценки противоизносной способности масла. Одновременно измеряется диаметр пятна износа, образовавшегося на каждом из трех закрепленных шариков. На некоторые масла диаметр пятна износа указывается в стандарте

или паспортных данных. Таким же образом определяется эффективность противоизносных присадок.

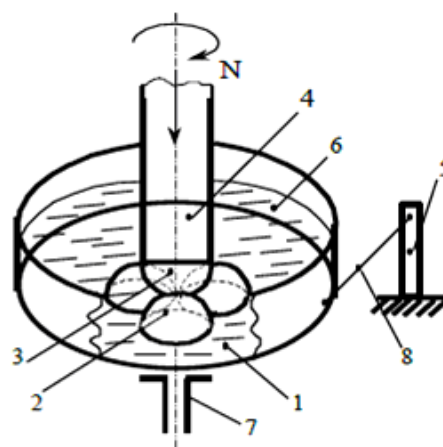


Рис. 1. Схема рабочего узла четырехшариковой испытательной машины

Широкое применение получили устройства, сущность которых состоит в триботехническом испытании сопряжения с точечным или линейным контактом, образованным вращающимся с постоянной и малой скоростью образцом и тремя (или одним) неподвижными образцами, при постоянной нагрузке и возможности изменения от внешнего источника тепла объемной температуры образцов и окружающего их смазочного материала, регистрацией момента трения во время испытания.

Устанавливаются шесть схем испытаний (рис. 2):

A – испытания при контакте вращающегося шара с тремя неподвижными шарами;

Б – испытания при контакте вращающегося шара со сферическим пояском на пересечении торцевой поверхности внутреннего отверстия нижнего образца, выполненного в виде кольца;

В – испытания при контакте вращающегося шара с тремя образцами с плоскими рабочими поверхностями;

Д – испытания при контакте вращающегося конического образца с тремя цилиндрическими образцами, равнорасположенными относительно оси вращения образца;

Е – испытания при контакте вращающегося конического образца с коническим пояском на пересечении торцевой поверхности и внутреннего отверстия нижнего образца, выполненного в виде кольца.

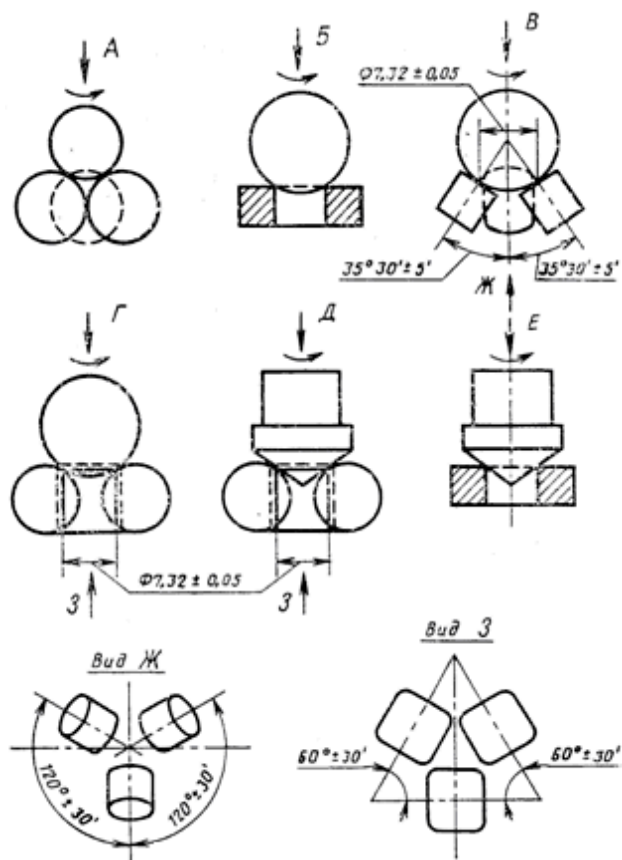


Рис. 2. Схемы испытания метода определения температурной стойкости при трении

Испытания по схемам *А*, *В*, *Г*, *Д* могут быть распространены на испытания смазочных материалов для зубчатых колес, подшипников качения, сопряжений «кулачок – толкатель» и «поршневое кольцо – гильза цилиндра двигателя внутреннего сгорания».

Испытания по схемам *Б* и *Е* могут быть распространены на испытания смазочных материалов для подшипников скольжения и сопряжений «поршневое кольцо – гильза двигателя внутреннего сгорания».

Объемную температуру узла трения и окружающего его смазочного материала измеряют с помощью термопары, спай которой должен быть прижат к одному из нижних образцов на расстоянии 1...3 мм от зоны трения. Смазочный материал и узел трения пе-

ред каждым определением нагревают при собранном узле трения, но без приложения нагрузки. При достижении заданной температуры узел трения нагружают, включают самописец динамометра и привод шпинделя машины. В процессе испытания самописец на трибограмме регистрирует изменение момента трения. Продолжительность вращения шпинделя с верхним образцом – 60 с погрешностью не более ± 1 с. Затем привод шпинделя и самописец выключают, нагрузку снимают.

Широкое распространение имеют и трехшариковые машины трения со схемой трения «шар-цилиндр» [2–4], преимущества которых заключаются в контакте трех шаров с цилиндром по индивидуальным дорожкам трения, что позволяет исследовать рельеф изношенной поверхности и исключить влияние рельефа поверхностей других шаров на формирование пятна износа, что наблюдается в четырехшариковой машине трения.

В институте нефти и газа Сибирского федерального университета разработана более совершенная трехшариковая машина трения, общий вид которой представлен на рис. 3, *а*. Данная машина содержит станину 1 и установленную на ней перпендикулярно плиту 2. На плите шарнирно установлены три кронштейна 3, в которых установлены съемные держатели 4 контрообразцов (шаров) 5, и узлы нагружения 6, выполненные с горизонтальными платформами для установки нагрузки. Центральный контрообразец установлен вертикально, а боковые – под равными углами 45° и выполнены со смещением, так, чтобы каждый контрообразец контактировал с образцом по индивидуальной дорожке трения. Машина трения также снабжена ванночкой 7 для испытуемого масла, которая размещена в термостате 8, соединенном с блоком установки и автоматического поддержания температуры испытания 9, приспособлением для подвода стабилизированного напряжения к испытуемому образцу 10, установленному на приводе вращения образца, соединенного через центральный контрообразец с блоком питания, устройством регистрации тока, протекающего через испытуемый образец и граничный слой смазочного материала.

Устройство работает следующим образом.

На вал 11 электродвигателя в держатель 12 закрепляют образец 10 и с помощью микрометра 13 контролируют радиальное биение, добиваясь наименьшей его величины, в держатели 4 (рис. 3, *б*) устанавливают контрообразцы 5 и закрепляют их, устанавливают величину тока подаваемого через средний кронштейн 3 на контрообразец 5 с помощью регулятора величины тока 14, и используемое масло заливают в ванночку 12. Включают привод вращения образца 10 и при наборе установленной температуры масла кронштейны 3 опускают на образец 10 и прикладывают нагрузку. Во время трения от блока питания 15 (рис. 3, *в*), через потенциометры 16 (R1) и 17 (R2) и центральный кронштейн 3 с контрообразцом 5 на образец 10 подается ток, величина которого устанавливается регулятором 14 величины тока, далее ток поступает в блок 18 регистрации тока, где он преобразуется

в электронный вид и записывается на вычислительном устройстве (ВУ) 19 в виде диаграммы изменения тока (рис. 4).

По диаграммам определяют продолжительность суммарной деформации, скорость образования и разрушения защитных слоев на поверхностях трения, их

прочность и связь с основой твердого тела, что повышает информативность испытания.

После испытания производят измерения диаметра пятна износа с помощью микроскопа (рис. 5). Для этого кронштейны 3 поднимают в верхнее положение и извлекают контробразцы 5.

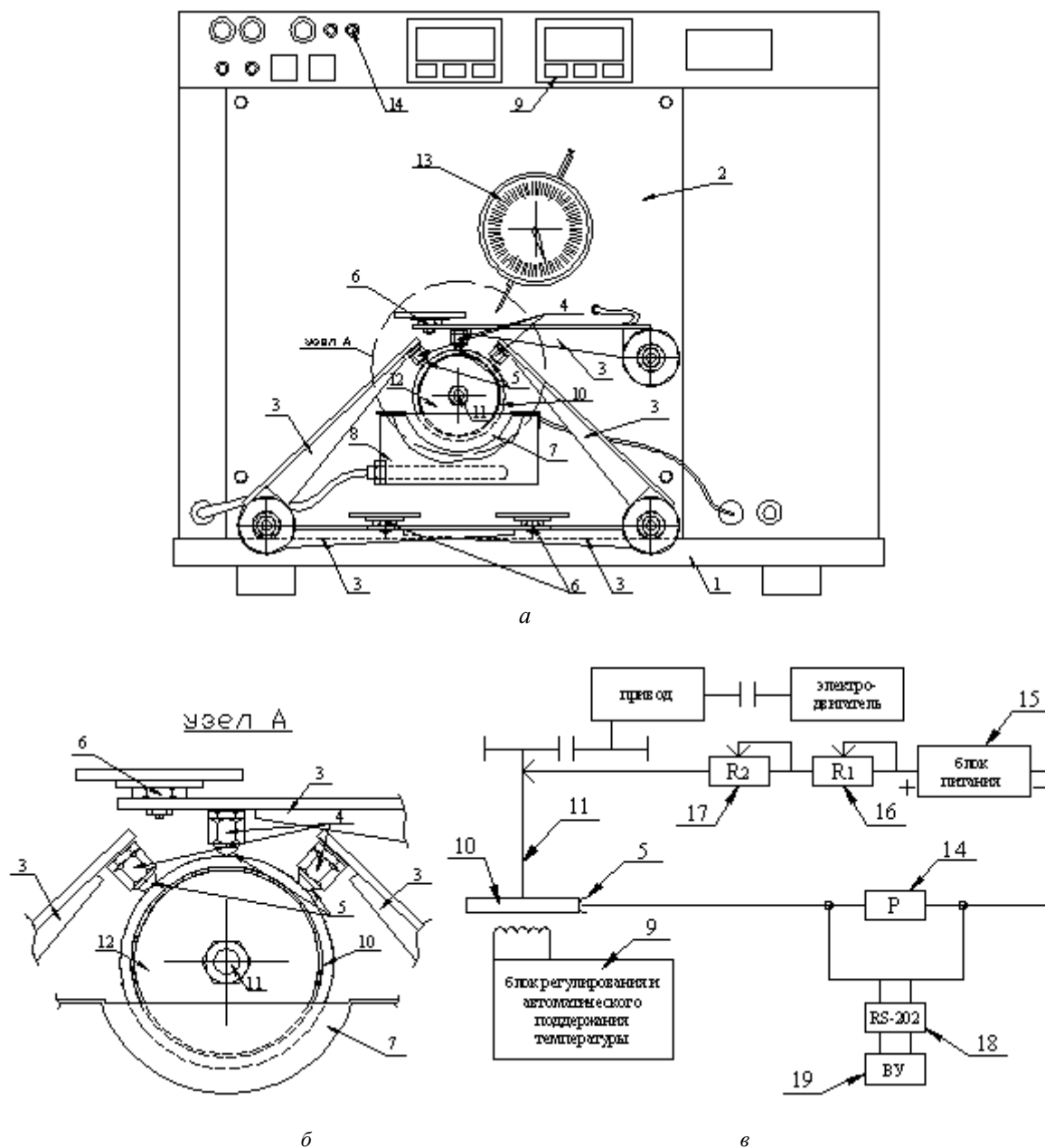


Рис. 3. Трехшариковая машина трения со схемой трения «шар–цилиндр»:
а – общий вид; б – детализовка трибосопряжения; в – электрическая схема

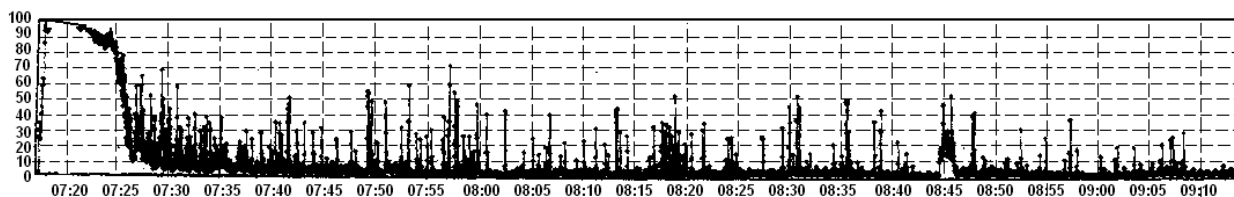


Рис. 4. Диаграмма записи тока

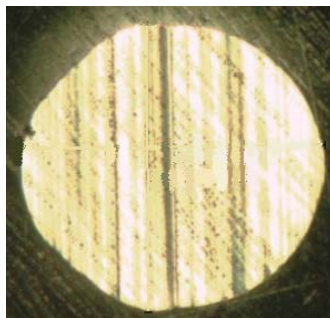


Рис. 5. Фотография пятна износа

Предложенное устройство просто в эксплуатации и позволяет получить все необходимые показатели качества трущихся материалов и масел с большей точностью и информативностью при меньшей трудоемкости испытаний по сравнению с предыдущими устройствами.

Библиографические ссылки

1. Беркович И. И., Громаковский Д. Г. Трибология, физические основы, механика и технические приложения : учебник для вузов / под ред. Д. Г. Громаковского ; Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. 268 с.

2. Матвеевский Р. М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. М. : Наука. 1971.

3. А. с. № 983522 СССР. МПК G 01 N 19/02. Оpubл. 1982.

4. Ковальский Б. И., Безбородов Ю. Н., Петров О. Н., Тихонов В. И. Патент № 2428677 Российская Федерация, G01N 19/02. Устройство для испытания трущихся материалов и масел. Оpubл. 10.09.2011. Бюл. № 25.

© Ковальский Б. И., Петров О. Н., Шрам В. Г., Сокольников А. Н., Игнатъев А. А., 2012

УДК 519.7, 612.8

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА НЕЙРОНОВ СЕТИ НА ЕЕ ОБУЧЕНИЕ И ТОЧНОСТЬ ПРОГНОЗА

В. А. Лоренц¹, В. Л. Гавриков², Р. Г. Хлебопрос¹

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: forest555@yandex.ru

²Красноярский государственный педагогический университет имени В. П. Астафьева

Россия, Красноярск, ул. Перенсона, 7. E-mail: gavrikov@kspu.ru

Анализируется зависимость ошибок обучения нейронной сети от числа нейронов. Обнаружен эффект резкого ухудшения параметров обучения и прогноза при некоторых значениях числа нейронов, который может быть связан с влиянием начальных условий, вносящих случайную компоненту в стартовую конфигурацию значений весовых коэффициентов нейронной сети.

Ключевые слова: нейронная сеть, число нейронов, ошибка обучения, ошибка прогноза.

INFLUENCE OF NETWORK NEURONS NUMBER TO NETWORK TRAINING AND FORECAST ACCURACY

V. A. Lorents¹, V. L. Gavrikov², R. G. Khlebopros¹

¹Siberian Federal University

26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: forest555@yandex.ru

²Krasnoyarsk State Teacher Training University named after V. P. Astafiev

7 Perensona street, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: gavrikov@kspu.ru

The authors analyze neural network training error dependence on the neurons number. The effect of hard deterioration of training and forecast parameters at some values of neurons number has been found, which can be connected with entry conditions influence, bringing the casual component in the initial configuration of weight factors values of neural network.

Keywords: neural network, neurons number, training error, forecast error.

Вопрос о необходимых и достаточных свойствах сети для решения того или иного рода задач является одним из направлений нейрокомпьютерной науки. Принято считать, что в большинстве случаев в процессе обучения нейросети оптимальный вариант ее параметров получается на основе интуитивного подбора. Тем не менее большое значение имеет зависимость качества обучения и прогноза нейронной сети от параметров самой сети, которая может быть нетривиальной и требует специального исследования для любого класса задач. Знание зависимостей такого рода может помочь в решении важнейшей проблемы нейрокомпьютеринга – ускорения процесса обучения нейронных сетей. В данной работе была поставлена цель исследовать зависимость параметров обучения и прогноза нейронной сети от числа нейронов.

В эксперименте была использована нейросетевая надстройка «Модели», разработанная в Институте биофизики СО РАН, реализующая оперативный синтез аналитических моделей с регулируемым уровнем сглаживания эмпирических данных, функционирующая в среде MS Excel. В математическом отношении программа осуществляет нелинейную многомерную регрессию. В качестве интерполирующего используется один из вариантов многомерных представлений в виде интегралов Фурье с заменой интегралов конечными суммами. Используемая нейронная сеть по своей структуре может называться двухслойной, так как содержит «основной» слой нелинейных элементов типа $A \cdot \sin(\omega \cdot x + \varphi)$ и дополнительный слой линейных элементов. При оптимизации используется метод быстрого вычисления многомерных градиентов, известный в рамках нейросетевой идеологии под именем back propagation (обратного распространения ошибки) или метода множителей Лагранжа, лежащий также в основе теории оптимального управления, и метод сопряженных градиентов [1; 2].

Среди задаваемых параметров в данной работе используются следующие: число нейронов, число итераций при обучении, значение спектральной плотности, размер обучающей и тестовой выборок. Нейрон в терминах данной компьютерной среды – это условный элементарный компонент сети, выполняющий роль преобразователя входных сигналов. Под итерацией понимается дискретное изменение весовых коэффициентов нейронной сети, играющее роль единичного интервала времени в процессе решения задачи. Параметр «спектр» определяется как максимальный уровень допустимой нелинейности синтезируемой модели, пропорциональный уровню спектральной плотности. Обучающая выборка содержит последовательность входных данных нейронной сети, используемых для настройки внутрисетевых связей, т. е. непосредственно для процесса обучения. Тестовая выборка – это совокупность данных, имеющих ту же внутреннюю закономерность, что и задачи обучающей выборки, но не включенных в нее. Успешность обучения оценивается по таким параметрам, как ошибка обучения нейронной сети, представляющая собой среднеквадратичное отклонение предсказаний сети от эмпирических входных данных, составляю-

щих обучающую выборку, и ошибка прогноза нейронной сети для тестовых задач, не участвующих в обучении.

В работе использовалась тестовая задача распознавания периодической закономерности. В качестве модельного объекта была выбрана функция $\sin(x)$. На единственный вход сети подавались значения функции $\sin(x)$ и они же служили эталоном для сравнения, что по сути является элементарным тождественным преобразованием. Согласно теореме Вейерштрасса о возможности равномерной аппроксимации непрерывной действительной функции, определенной в диапазоне $[-1, 1]$, с помощью полиномов с любой точностью, а также теоретическим доказательствам полноты класса функций, вычислимых нейросетями [3], бесспорным является то, что при довольно слабых ограничениях нейросеть успешно решает задачи распознавания закономерностей типа $\sin(x)$. Соответственно, именно это обстоятельство лежит в основе выбора функции $\sin(x)$ в данной работе, и задача выяснить, может ли нейросеть распознать эту периодичность, не ставилась, так как основной вопрос данной работы – это выявление параметров, влияющих на процесс обучения нейросети, и однозначен ли этот механизм.

В ходе вычислительного эксперимента отслеживалась обучаемость нейронной сети и динамика параметров обучаемости сети в зависимости от числа нейронов. Под обучаемостью нейросети здесь понимается такое количественное значение ошибок обучения и прогноза, которое соответствует прогнозным значениям функции синус, качественное воспроизводящим форму кривой синуса. По нашему мнению, такой критерий, как качественное воспроизведение нейросетью периодической закономерности, вполне адекватно соответствует цели данной работы.

Оценка ошибки обучения при каждом значении числа нейронов проводилась в 50-кратной повторности. Достоверность отличий ошибок обучения нейросети при попарно различных значениях числа нейронов проверялась наиболее распространенными непараметрическими критериями сравнения двух независимых групп (критерий серий Вальда–Вольфовица, критерий Колмогорова–Смирнова, U-критерий Манна–Уитни).

На предварительном этапе вычислений было установлено, что задача распознавания синуса нейронной сетью решается удовлетворительно, если обучающая выборка содержит не менее $\frac{3}{4}$ периода синуса, что соответствует 30 значениям данных в обучающей выборке. Это означает, что на основе информации о $\frac{3}{4}$ периода входной функции нейросеть в состоянии воспроизводить эту функцию на любом заданном интервале тестовой выборки. Размер тестовой выборки, предлагаемой для прогноза нейросети, был ограничен $5\frac{1}{2}$ периода синуса, что обусловлено соображениями достаточности.

Запуски решения задачи распознавания периодичности нейронной сетью, сопровождаемые отслеживанием динамики обучаемости нейросети, проводились при разных значениях числа нейронов, прочие же па-

Таблица 1

**Статистическая оценка значимости максимумов
при числе итераций – 1**

Сравниваемые пары значений ошибок обучения нейросетей	Достоверность различий средних на уровне $p < 0,05$
Для 2 нейронов и 4 нейронов	Значимо по трем критериям
Для 5 нейронов и 7 нейронов	Не значимо
Для 8 нейронов и 9 нейронов	Значимо по одному критерию

параметры нейронных сетей были одинаковыми. По снятым данным выполнено 9 вычислений средних параметров обучаемости нейронной сети, каждое из которых рассчитывалось для семейства нейронных сетей (50 нейросетей с совпадающими параметрами). Нельзя не отметить роль количества итераций в поставленном эксперименте: минимальное количество итераций было выбрано исходя из вероятного значительного практического значения, которое могут иметь сведения о работе нейронных сетей в таком жестком режиме. В созданных условиях нейронная сеть осуществляет однократный просмотр обучающей выборки, что соответствует начальной стадии обучения. Именно с этой точки зрения можно рассматривать процесс обучения нейронной сети как эволюцию показателей ее обучения на разных этапах, и уже на этих первых шагах обучения наблюдается неожиданный, нестандартный эффект.

В процессе эксперимента были отмечены близкие значения средних ошибок обучения и прогноза нейронной сети, свидетельствующие об удовлетворительном распознавании нейронной сетью предложенной периодичности, что не противоречит теоретическим представлениям. По полученным результатам построена зависимость средней ошибки обучения в абсолютном виде от числа нейронов, представленная на рис. 1.

Согласно данным рис. 1, наблюдаются нерегулярные эффекты влияния значения числа нейронов (например, число нейронов $N = 4, 7, 9$) на средние ошибки обучения. При указанных значениях числа нейронов параметры обучаемости нейросети резко ухудшаются по отношению к значениям ошибок слева и справа от них. В ходе эксперимента обнаружено, что для большинства значений числа нейронов обучение и прогноз в семействе нейронных сетей характеризуются небольшим разбросом значений ошибок, однако выделенные значения числа нейронов ($N = 4, 7, 9$) отличаются значительной дисперсией полученных результатов.



Рис. 1. Влияние числа нейронов на ошибку обучения (—○—) нейронной сети при следующих условиях: значение спектральной плотности – 0,1, число итераций – 1

Помимо этого была произведена статистическая оценка значимости наблюдаемых максимумов, результаты которой представлены в табл. 1.

Сравнивая данные табл. 1 и кривую, изображенную на рис. 1, можно заметить, что наличие второго максимума не подтверждается статистическими критериями из-за значительной дисперсии экспериментальных данных.

Что касается вероятных причин данного явления, то, возможно, выявленный эффект может быть связан с чувствительностью нейронной сети при небольшом числе итераций к влиянию начальных условий, содержащих случайную компоненту. Различные значения начальных условий могут существенно менять картину результатов благодаря формированию более или менее благоприятных для обучения стартовых значений весовых коэффициентов.

Поскольку резкие ухудшения параметров обучения и прогноза нейронной сети при некоторых значениях числа нейронов (см. рис. 1) могут быть связаны с минимальным числом итераций, была построена зависимость ошибки обучения от числа нейронов при числе итераций 1 000, отображенная на рис. 2. Из полученной кривой следует, что установленный ранее эффект влияния числа нейронов на успешность обучения нейронной сети (см. рис. 1) сохраняется.

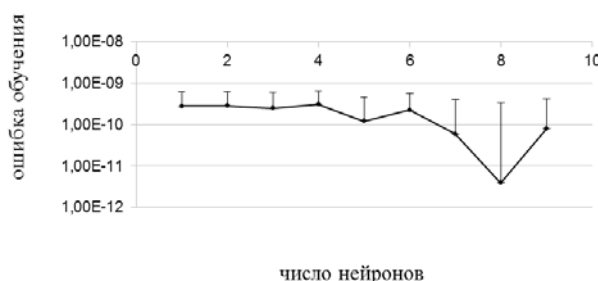


Рис. 2. Влияние числа нейронов на ошибку обучения (—○—) нейронной сети при следующих условиях: значение спектральной плотности – 0,1, число итераций – 1 000

Как и на первом этапе эксперимента была проведена оценка статистической значимости максимумов полученной кривой, отображенная в табл. 2, которая позволяет заключить, что эффект резкого ухудшения обучения при некоторых значениях количества нейронов имеет устойчивую тенденцию сохраняться и при больших значениях числа итераций.

То обстоятельство, что максимумы кривых на рис. 1 и 2 не всегда совпадают, вероятно, может быть связано с тем, что конкретный вид зависимости ошибки обучения нейронной сети от количества нейронов зависит от длительности обучения (количеством итераций) и его выявление требует дальнейших экспериментов с нейронными сетями.

Статистическая оценка значимости максимумов при числе итераций – 1000

Сравниваемые пары значений ошибок обучения нейросетей	Достоверность различий средних на уровне $p < 0,05$
Для 2 нейронов и 3 нейронов	Значимо по трем критериям
Для 4 нейронов и 5 нейронов	Значимо по двум критериям
Для 6 нейронов и 7 нейронов	Значимо по одному критерию
Для 9 нейронов и 10 нейронов	Не значимо

Полученные кривые зависимости параметров обучения и прогноза нейронной сети от числа нейронов характеризуются значительной немонотонностью. Природа наблюдаемого эффекта заложена в самом вычислительном механизме нейронной сети и предположительно отражает чувствительность нейронной сети к начальным условиям. Выявленный эффект влияния количества нейронов на обучаемость нейронной сети может иметь важное практическое и теоретическое значение.

Проведена проверка на наличие эффекта переобучения нейронной сети на каждом этапе эксперимента путем включения в тестовую выборку значений синуса с отличным шагом и некратными значениями по сравнению со значениями обучающей выборки: переобучения нейронной сети не выявлено.

* Авторы благодарят сотрудников Института биофизики СО РАН Барцева С. И. и Щемеля А. Л. за любезное предоставление нейронной сети и ценный

вклад при обсуждении результатов, а также профессора СФУ Миркеса Е. М.

Библиографические ссылки

1. Барцев С. И., Охонин В. А. Адаптивные сети обработки информации // Препринт ИФ СО АН СССР, Красноярск, 1986. № 59Б.
2. Горбань А. Н. Обучение нейронных сетей. М. : ParaGraph, 1990. (English Translation: AMSE Transaction, Scientific Siberian, A. 1993. Vol. 6. Neurocomputing. P. 1–134)
3. Носков М. В., Симонов К. В., Щемель А. Л. Нелинейная многопараметрическая регрессия данных наблюдений // Вопросы математического анализа. Красноярск : ИЦП КГТУ, 2003. Вып. 7. С. 103–120.

© Лоренц В. А., Гавриков В. Л.,
Хлебопрос Р. Г., 2013

УДК 621.311.65

МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТЯГОВЫХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А. А. Минина¹, В. И. Пантелеев¹, Е. В. Платонова²

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: pvi0808@rambler.ru

²Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета

Россия, 655017, Абакан, Щетинкина, 27. E-mail: eplatonova@yandex.ru

Показана программа расчета нормальных и резонансных режимов с методикой расчета сети с нелинейной нагрузкой на примере тяговой подстанции, позволяющая на основе анализа частотной характеристики входного сопротивления $Z_{\text{вх}} = f(\nu)$ определять спектры токов и напряжений в элементах сети, а также оценивать уровни активных потерь и перегрузки компенсирующих устройств токами высших гармоник.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, резонанс, входное сопротивление сети, компенсирующее устройство, гармоники.

METHOD OF SELECTION OF PARAMETERS REACTIVE POWER COMPENSATION IN TRACTION AC NETWORKS

A. A. Minina¹, V. I. Panteleev¹, E. V. Platonova²

¹Siberian Federal University

26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: pvi0808@rambler.ru

²Khakas Technical Institute – branch of the Siberian Federal University

27 Shchetinkin street, Abakan, 655017, Russia. E-mail: eplatonova@yandex.ru

The authors show a program for calculation of normal and resonant modes with a procedure of calculation of a network with nonlinear load on the example of traction substation, which allows, on the basis of the analysis

of frequency characteristics of the input resistance $Z_{\text{вх}} = f(v)$, to appreciate the range of currents and voltages in the network elements, and to assess the levels of active losses and overloads of compensating devices with currents of higher harmonics.

Keywords: reactive power compensation, resonance, input impedance network, compensating device, harmonics.

Компенсация реактивной мощности на тяговых подстанциях переменного тока в настоящее время выполняется с использованием конденсаторных батарей (КБ), что позволяет увеличить пропускную способность транзита за счет нормализации напряжения в сетях, увеличить надежность энергоснабжения потребителей в моменты максимальных нагрузок, решить вопрос энергосбережения. Одним из недостатков применения КБ при компенсации реактивной мощности является вероятность возникновения резонансных явлений в сетях 27,5 кВ и 35 кВ тяговых подстанций. Резонансный контур образуется путем параллельного или последовательного соединения емкостных элементов КБ с индуктивными элементами (трансформаторы, питающие линии и т. д.). На резонансной частоте индуктивное сопротивление $X_{L(n)}$ и емкостное сопротивление $X_{C(n)}$ равны, т. е. $n\omega L = 1/(n\omega C)$, где $X_{L(n)} = n\omega L$ – входное сопротивление сети в точке подключения КБ, сопротивление которой $X_{C(n)} = 1/(n\omega C)$.

Частотная характеристика эквивалентного входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$ резонансного контура относительно шин 27,5 кВ имеет полюса на частотах, определяемых соотношением величин емкостного и индуктивного сопротивлений контура. Наличие в сети токов высших гармоник, генерируемых преобразовательной нагрузкой, обуславливает резонансные усиления напряжения на частотах, соответствующих полюсам частотной характеристики, что в свою очередь способствует растеканию по элементам внешней сети токов высших гармоник, существенно превышающих их предельно допустимые (согласно ГОСТ 13109–97) значения. Таким образом, резонансные явления приводят к преждевременному выходу из строя самих КБ, создают дополнительные потери мощности в сети от протекания токов высших гармоник, существенно ухудшают качество напряжения по критерию несинусоидальности и создают проблемы электромагнитной совместимости для потребителей районных электрических сетей напряжением 35 или 10(6) кВ, а также для нетяговых потребителей, подключенных напрямую к контактной сети (фидеры ДПР и СЦБ).

В ходе исследования резонансных явлений для ряда тяговых подстанций Абаканской дистанции электроснабжения Красноярской железной дороги были произведены измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в сетях напряжением 110 кВ (220 кВ), а также на стороне вторичных напряжений подстанций (27,5 кВ и 35 кВ), где тяговая сеть была выполнена традиционно. Одна из вторичных обмоток силового трансформатора питает тяговую нагрузку 27,5 кВ, а вторая – напряжением 35(10) кВ – питает районную сеть. В результате исследований были выявлены резонансные явления.

Это говорит о том, что на этапе проектирования подстанций из-за несовершенства методик расчета несинусоидальных режимов, применяемых при выборе параметров компенсирующих устройств (КУ), была неверно оценена требуемая мощность КБ, ее сопротивление и место подключения.

В данной работе предлагается альтернативная практическая методика по выбору параметров средств компенсации реактивной мощности. Методика заключается в том, что на основе анализа частотной характеристики (ЧХ) входного сопротивления сети $Z_{\text{вх}}$, определяют спектры токов и напряжений в элементах сети, а также оценивают уровни активных потерь и перегрузки КУ токами высших гармоник при выборе КБ и фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) на подстанциях, имеющих нелинейную нагрузку.

Вид ЧХ типа $Z_{\text{вх}} = f(v)$ зависит от узла расчетной схемы и ее параметров. Расчеты ЧХ для сложных разветвленных схем СЭ производятся средствами Mathcad 2000 Professional, а сама методика выбора средств компенсации реактивной мощности включена в разработанную программу расчета нормальных и резонансных режимов в Delphi-7, где на основе ввода паспортных характеристик и результатов замеров ПКЭ тяговой подстанции можно оценивать уровень высших гармоник и суммарные потери от протекания токов всех гармоник в сети (рис. 1).

Программа позволяет выбирать расчетные схемы тяговой подстанции с различными устройствами компенсации реактивной мощности.

Схема с КБ (рис. 2, а), схема с КБ и реактором (рис. 2, б), схема с ФКУ (рис. 2, в).

Предложенную методику проиллюстрируем на примере сравнительного анализа качества напряжения и выбора варианта КУ для одной из тяговых подстанций Красноярской железной дороги.

Однолинейная схема подстанции приведена на рис. 3, а, а ее расчетная схема – на рис. 3, б.

В схему замещения для расчета ЧХ входного сопротивления $Z_{\text{вх}} = f(v)$ включены:

Z_{Cv} – сопротивление питающей системы;

$Z_{ТВv}$, $Z_{ТСv}$, $Z_{ТНv}$ – сопротивления обмоток высокого, среднего и низкого напряжения трансформатора;

Z_{Hv} – сопротивление обобщенной нагрузки на стороне 35 кВ;

$Z_{КБv}$ и Z_{Pv} – сопротивления конденсаторной батареи типа КЭК-1,05-75-2УЗ мощностью 3,85 МВА и реактора РБКА-200, установленных в настоящее время на подстанции;

$Z_{ФКУv}$ – эквивалентное сопротивление рекомендуемого нами к установке ФКУ, в состав которого входят фильтры 3, 5, 7, 9-й гармоник, суммарная

мощность, генерируемая ФКУ, эквивалентна мощности, генерируемой конденсаторной батареей, установленной в настоящее время на подстанции;

J_v – суммарный спектр тока, генерируемый тяговой нагрузкой.

Form1

Ввод исходных данных

Система (параметры выключателя)		Силовой трансформатор	
Номинальный ток отключения, I_n , кА	25	Номинальная мощность, S_n , МВА	40
Номинальное напряжение U_B , кВ	220	Напряжения короткого замыкания, %	
Активное сопротивление системы, R_c , Ом	0	U_{B-c}	12,5
		U_{B-n}	22
		U_{c-n}	9,5
		Потери короткого замыкания, dP_k , кВт	240
		Номинальные напряжения обмоток, кВ	
		$U_{ном в}$	220
		$U_{ном с}$	35,5
		$U_{ном н}$	27,5
Тяговая сеть		Нагрузка районная	
Мощность КБ $Q_{кб}$, МВАр	3,85	Коэффициент мощности, $\cos \phi$	0,96
☒ Расчет по схеме с КБ	Схема с КБ	Мощность номинальная сети, $P_{ном}$, кВт	2236,2
☒ Расчет по схеме с КБ и реактором	Схема с КБ и реактором	Номинальное напряжение U_c , кВ	35
Номер гармоники	7		
Инд. сопротивление реактора, X_r , Ом	4,01		
☒ Расчет по схеме с ФКУ	Схема с ФКУ		
№ гармоники 1	3	Инд. сопр. реактора 1, X_r , Ом	21,83
№ гармоники 1	5	Инд. сопр. реактора 2, X_r , Ом	7,85
№ гармоники 1	7	Инд. сопр. реактора 3, X_r , Ом	4,01
№ гармоники 1	9	Инд. сопр. реактора 4, X_r , Ом	2,41

Next

Edit3

Рис. 1. Программа расчета нормальных и резонансных режимов СЭ

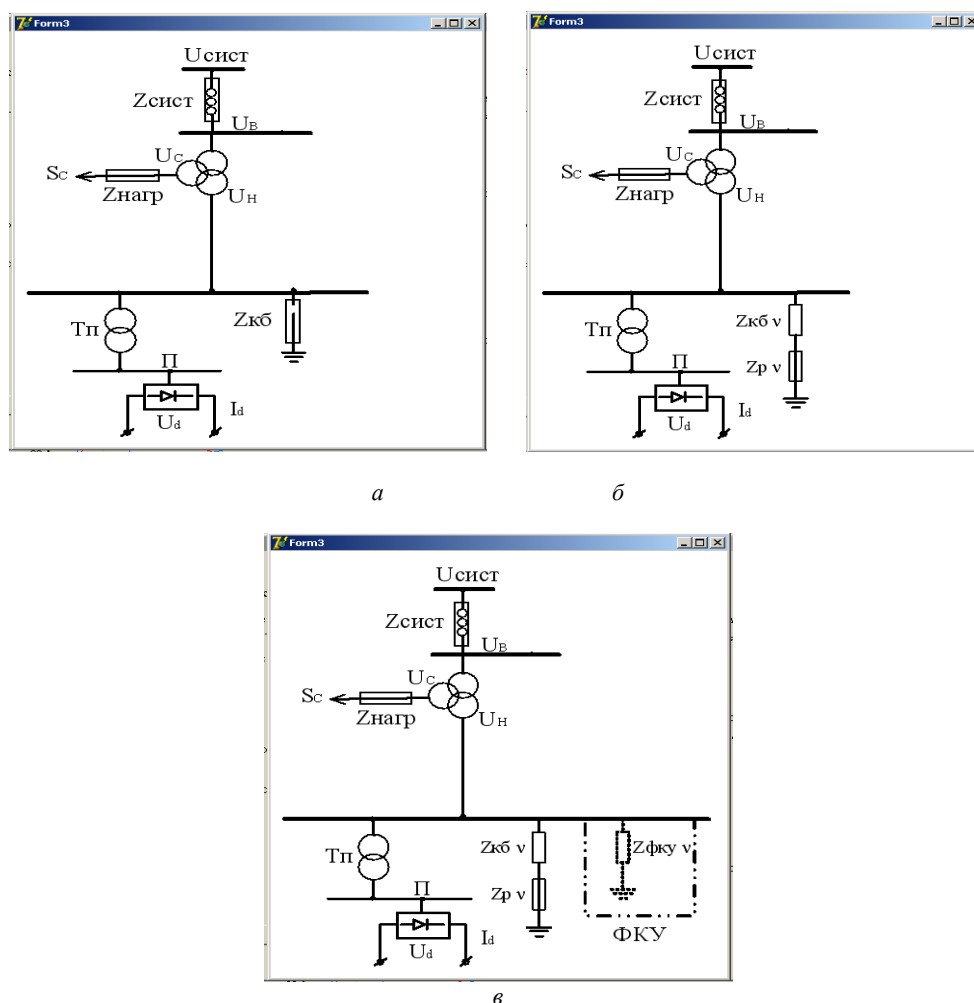


Рис. 2. Расчетные схемы

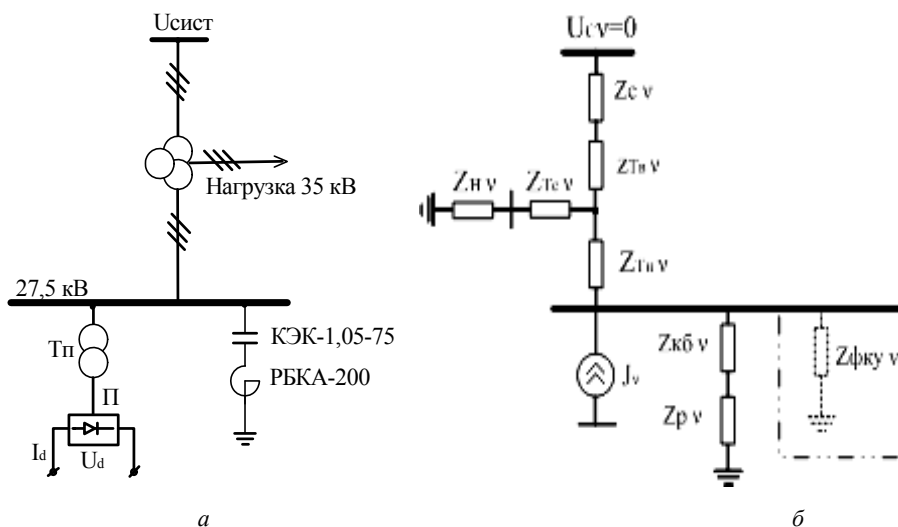


Рис. 3. Однолинейная схема и схема замещения подстанции

На рис. 4 представлены ЧХ входного сопротивления сети рассчитанные по методике в Mathcad 2000 Professional относительно шин 27,5 кВ для случая отсутствия КУ, случая подключения КБ и реактора (действующая схема) и случая подключения ФКУ (рекомендуемая схема).

При отсутствии ФКУ

$$Z_{вхv} = \frac{Z_{1v} \cdot Z_{2v}}{Z_{1v} + Z_{2v}} + Z_{3v},$$

где $Z_{1v} = Z_{cv} + Z_{TBv}$; $Z_{2v} = Z_{TCv} + Z_{Hv}$;

$Z_{3v} = Z_{THv}$.

При подключении КБ

$$Z_{вхv}(КБ) = Z_{4v} \times \frac{(Z_{1v} \cdot Z_{2v} + Z_{3v} \cdot Z_{1v} + Z_{3v} \cdot Z_{2v})}{(Z_{1v} \cdot Z_{2v} + Z_{3v} \cdot Z_{1v} + Z_{3v} \cdot Z_{2v} + Z_{4v} \cdot Z_{1v} + Z_{4v} \cdot Z_{2v})},$$

где $Z_{4v} = Z_{KBv} + Z_{Pv}$,

и при подключении ФКУ

$$Z_{вхv}(ФКУ) = Z_{5v} \times \frac{(Z_{1v} \cdot Z_{2v} + Z_{3v} \cdot Z_{1v} + Z_{3v} \cdot Z_{2v})}{(Z_{1v} \cdot Z_{2v} + Z_{3v} \cdot Z_{1v} + Z_{3v} \cdot Z_{2v} + Z_{5v} \cdot Z_{1v} + Z_{5v} \cdot Z_{2v})},$$

где $Z_{5v} = Z_{ФКУv}$.

На рис. 5 представлены ЧХ входного сопротивления сети, рассчитанные с помощью программы Delphi-7.

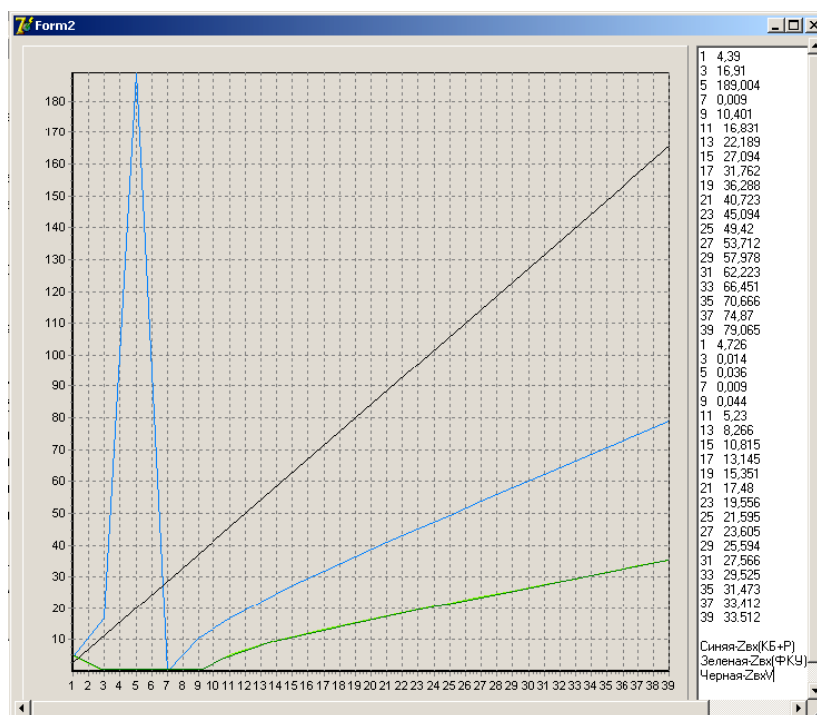


Рис. 5. Частотные характеристики входного сопротивления сети

Частотные характеристики на рис. 4 и 5 с включением на подстанции КБ (действующая схема) свидетельствует о резонансном усилении 5-й гармоники токов и напряжений вследствие появления полюса ЧХ на резонансной частоте.

Очевидно, что с включением КБ в качестве КУ имеет место усиление 3-й гармоники тока в 2,32 раза, 5-й гармоники тока – в 5,93 раза, а потери активной мощности на этих частотах превышают потери на основной частоте в 5,39 и 35,15 раза соответственно.

Суммарные потери от протекания токов всех гармоник в сети возрастают в 44,31 раза и практически равны величине активных потерь на основной частоте.

Рекомендуемое к установке ФКУ, как видно на рис. 4 и 5, позволяет практически полностью исключить протекание в сети токов 3, 5, 7, 9-й гармоник и существенно снизить величины гармоник более высокого порядка. Несмотря на некоторое увеличение гармоник высокого порядка по сравнению с вариантом установки КБ в качестве КУ, суммарные потери активной мощности от протекания токов высших гармоник возрастают только в 3,92 раза и не превышают значений, нормируемых ГОСТ 13109–97, что свидетельствует о существенно более высокой эффективности применения ФКУ в качестве КУ при той же генерируемой реактивной мощности.

Библиографические ссылки

1. Глушаков С. В., Жакин И. А., Хачиров Т. С. Математическое моделирование: Учебный курс. М.: АСТ, 2001.

2. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000.

3. Иванов В. С. Метод расчета несинусоидальности напряжения и исследование резонансных явлений на высших гармониках в сети внутрезаводского электроснабжения при работе вентельных преобразователей: автореферат. М.: МЭИ, 1978.

4. Маркман Г. З. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электрической энергии. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008.

5. Минина А. А., Платонова Е. В. Исследование несинусоидальности напряжения на тяговых подстанциях переменного тока // Современные техника и технологии: сб. тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1. Томск: Изд-во Томского политехнич. ун-та, 2010.

6. Минина А. А., Пантелеев В. И. Обеспечение электромагнитной совместимости при компенсации реактивной мощности на тяговых подстанциях переменного тока // Всерос. конкурс науч. работ студентов, магистрантов и аспирантов «Компьютерные технологии и информационные системы в электротехнике»: сб. материалов / отв. за вып. А. А. Северин, М. Н. Третьякова (Тольятти, 29 нояб. 2011 г.). Тольятти: Изд-во ТГУ, 2011.

© Минина А. А., Пантелеев В. И.,
Платонова Е. В., 2013

УДК 537.612

ТЕОРЕТИКО-ГРУППОВОЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР ТВЕРДОГО РАСТВОРА $Ni_5GeO_4(BO_3)_2$

И. И. Назаренко, С. Н. Софронова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: ilnz007@live.ru

Проведен симметричный анализ возможных магнитных структур кристалла $Ni_5GeO_4(BO_3)_2$, возникающих в результате фазовых переходов. Получены базисные функции неприводимых представлений, входящих в магнитное представление этой структуры, показывающие вероятные направления магнитных моментов атомов $Ni_5GeO_4(BO_3)_2$. Полученные результаты помогут интерпретации экспериментальных данных при установлении истинной магнитной структуры и механизмов магнитных переходов в исследуемом соединении.

Ключевые слова: магнетизм, теоретико-групповой анализ, людвициты.

GROUP-THEORETICAL ANALYSIS OF $Ni_5GeO_4(BO_3)_2$ POTENTIAL MAGNETIC STRUCTURES

I. I. Nazarenko, S. N. Sofronova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: ilnz007@live.ru

The work presents a group-theoretical analysis which makes possible to determine $Ni_5GeO_4(BO_3)_2$ crystal potential magnetic structures. The obtained information will help to analyze and interpret experimental data, while determining the true magnetic structure and the mechanisms of magnetic transitions in the compound being tested.

Keywords: magnetism, group-theoretical, ludwigites.

В Институте физике имени Л. В. Киренского СО РАН были выращены и активно исследуются кристаллы $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$. Для понимания природы и механизмов фазовых переходов в этом соединении необходимо установить магнитную структуру в низкотемпературной фазе, что прямыми экспериментальными методами возможно лишь в нескольких научных центрах в мире. Симметричный анализ в совокупности с экспериментальными исследованиями намагниченности и других магнитных свойств позволяет предположить магнитную структуру исследуемого соединения.

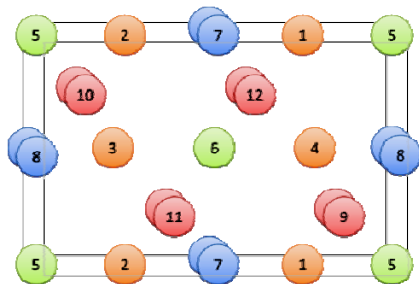


Рис. 1. Магнитные ионы в элементарной ячейке кристалла $\text{Ni}_5\text{Ge}(\text{O}_2\text{BO}_3)_2$

Кристаллы $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$ принадлежат к семейству людовигитов. Кристаллическая структура исследуемого соединения относится к пространственной группе Pbam (№ 55). Элементарная ячейка содержит 10 магнитных атомов, которые расположены в симметричных позициях $4h$ (1–4 на рис. 1), $2b$ (5, 6 на рис. 1), $2c$ (7, 8 на рис. 1), $4g$ (9–12 на рис. 1). Интересной особенностью данного соединения является то, что часть ионов Ni (ион с магнитным моментом) и Ge (немагнитный ион) статистически разупорядочены в симметричной позиции $4g$ и занимают ее равной вероятностью (1/2). Вследствие этого при проведении симметричного анализа для этого случая мы будем считать, что в позиции $4g$ находится «усредненный» магнитный ион. Однако поскольку в реальном кристалле в малых локальных областях могут встречаться различные способы упорядочения ионов никеля и германия в позиции $4g$, мы рассмотрим несколько кристаллических структур, в которых ионы никеля и германия занимают определенные положения в позиции $4g$, т. е. упорядочены. В этом случае из двенадцати приведенных на рис. 1 положений магнитными ионами будут заняты только десять, причем два из них в позиции $4g$ (положения 9–12). В рамках одной элементарной ячейки существует всего три различных варианта упорядочения ионов никеля и германия, для каждого из них проведен симметричный анализ возможных магнитных структур. Кроме этого, мы приводим результаты симметричного анализа для удвоенной вдоль оси с элементарной ячейки, в этом случае различных вариантов упорядочения ионов никеля и германия гораздо больше, но мы, из-за ограниченного объема статьи, приводим лишь два наиболее интересных случая. Во всех случаях мы будем проводить

симметричный анализ для $k = 0$ (центр зоны Бриллюэна), то есть для случая, когда магнитная ячейка совпадает с кристаллографической ячейкой.

Симметричный анализ. Первым шагом при проведении симметричного анализа является построение магнитного представления для какой-либо звезды волновых векторов k и разложения этого представления на неприводимые представления [1, с. 154]:

$$d^k = \sum_v n^v \tau^{kv},$$

где τ^{kv} – неприводимое представление; n^v – кратность вхождения v -го неприводимого представления в приводимое, которая определяется по формуле

$$n^v = \frac{1}{n(G_k^0)} \sum_{h \in G_k^0} \chi^k(g) \chi^{*kv}(g),$$

где $n(G_k^0)$ – число элементов симметрии точечной группы волнового вектора G_k^0 . Характер магнитного представления определяется по правилу

$$\chi^k(g) = \delta_h \text{Sp} R^h \sum_j \exp[-ika_p(g, j)] \delta_{j, gj},$$

где элементы симметрии h взяты из [2, с. 312], действуют на векторы в трехмерном пространстве и представлены в виде трехмерных матриц R^h , $\delta_h = 1$, если h – обычный поворот, и $\delta_h = -1$, если h – инверсионный поворот; $a_p(g, j)$ – вектор возвращающей трансляции, символически определяемый формулой $g(0, i) = (a_p, j)$, т. е. вектор, который переводит атом j в атом i того же сорта нулевой ячейки; gj – формальная запись того номера атома, в который переходит атом номера j под действием элемента $g \in G_k$; $\delta_{j, gj}$ – символ Кронекера. χ^{kv} – характер неприводимого представления τ^{kv} .

Базисные функции неприводимых представлений можно определить по формуле

$$e_{\lambda}^i(kv) = \sum_{h \in G_k^0} \tau_{\lambda[\mu]}^{*kv}(g) \exp[-ika_p(g, j)] \delta_{j, g[j]} R_{[\beta]}^h,$$

где $\tau_{\lambda[\mu]}^{kv}(g)$ – матричный элемент матрицы неприводимого представления τ^{kv} , соответствующей элементу $g \in G_k$ группы волнового вектора k . Запись $R_{[\beta]}^h$ означает, что в формуле взят β столбец матрицы R^h . Суммирование в формуле проходит только по тем элементам $g = (h|\alpha)$, у которых h принадлежит кристаллическому классу G_k^0 группы волнового вектора G_k . Индексы μ, j, β в формуле, заключенные в квадратные скобки, должны фиксироваться. Эти индексы определяют старт при построении базисных функций. Изменение старта приводит либо к новой системе базисных функций, либо к нулю. Если непри-

водимое представление входит в состав магнитного представления несколько раз, то каждому такому вхождению соответствует свой базис. Поскольку магнитные моменты, образующие магнитную структуру, вещественны, базисные функции также должны быть получены в виде вещественных величин.

Анализ возможных магнитных структур неупорядоченного $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$. Как уже отмечалось выше в случае, когда ионы никеля и германия равномерно распределены в симметричной позиции 4g, кристаллическая структура принадлежит к пространственной группе Pbam (№ 55). Разложение приводимого магнитного представления на неприводимые для ($k=0$) для каждой симметричной позиции следующее:

$$d^{(k=0)}(4h) = 2\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4 + \tau_5 + 2\tau_6 + 2\tau_7 + \tau_8,$$

$$d^{(k=0)}(2b) = \tau_2 + 2\tau_4 + 2\tau_6 + \tau_8,$$

$$d^{(k=0)}(2c) = \tau_2 + 2\tau_4 + 2\tau_6 + \tau_8,$$

$$d^{(k=0)}(4g) = 2\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4 + \tau_5 + 2\tau_6 + 2\tau_7 + \tau_8.$$

Далее были построены базисные векторы (табл. 1), которые задают направления магнитных моментов на ионах. Оси x, y, z совпадают с кристаллографическими направлениями a, b и c пространственной группы Pbam (№ 55). Здесь и во всех последующих таблицах мы будем использовать именно эти обозначения, даже когда из удобства для некоторых случаев мы будем делать преобразование системы координат. Кроме того, мы предполагаем, что фазовый переход из парамагнитного состояния в магнитоупорядоченное состояние происходит одновременно во всей системе магнитных ионов. Несмотря на то что наше предположение не подтверждено экспериментальными данными, кристаллическая структура исследуемого соединения такова, что все магнитные ионы достаточно сильно связаны между собой обменными взаимодействиями и вероятнее всего переход в магнитоупорядоченное состояние будет происходить одновременно во всей системе магнитных ионов. В этом случае, исходя из концепции фазовых переходов по одному неприводимому представлению [3], можно ограничиться рассмотрением только тех неприводимых пред-

ставлений, которые входят в разложение для всех симметричных позиций. В данном случае это четыре неприводимых представления τ_2, τ_4, τ_6 и τ_8 . Неприводимым представлениям τ_2 и τ_8 соответствует легкоосная магнитная структура с антиферромагнитным и ферромагнитным упорядочением соответственно. Неприводимым представлениям τ_4 и τ_6 соответствует легкоплоскостная магнитная структура, причем в данном случае для обоих представлений базисные векторы являются линейной комбинацией двух векторов, один из которых соответствует случаю антиферромагнитного упорядочения, а второй – случаю ферромагнитного упорядочения.

Анализ возможных магнитных структур для различных случаев упорядочения ионов Ni и Ge в кристалле $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$.

P2₁am (№ 26). Рассмотрим упорядочение в рамках одной элементарной ячейки. Предположим что ионы 9, 12 являются магнитными (Ni), а 10 и 11 – немагнитными (Ge) (рис. 2). В данном случае кристаллическая структура принадлежит к пространственной группе P2₁am (№ 26) [4, р. 911]. Для выполнения расчетов удобнее выбрать другую систему координат. Переход от старой системы координат, соответствующей пространственной группе Pbam (№ 55), к новой осуществлен по следующему правилу:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/4 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

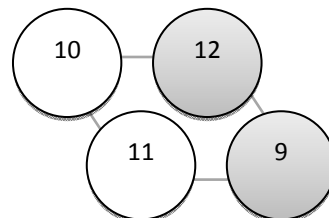


Рис. 2. Упорядочение магнитных ионов в позиции 4g группы № 55

Таблица 1

Направления магнитных моментов для случая неупорядоченного $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$

τ	Направления магнитных моментов на ионах
1	$e^1_x - e^2_x - e^3_x + e^4_x + e^9_x - e^{10}_x - e^{11}_x + e^{12}_x;$ $e^1_y - e^2_y + e^3_y - e^4_y + e^9_y - e^{10}_y + e^{11}_y - e^{12}_y;$
2	$e^1_z + e^2_z - e^3_z - e^4_z + e^9_z - e^{10}_z + e^{11}_z - e^{12}_z;$ $e^1_z + e^2_z - e^3_z - e^4_z + e^9_z - e^{10}_z + e^{11}_z - e^{12}_z;$
3	$e^1_z - e^2_z + e^3_z - e^4_z + e^9_z - e^{10}_z + e^{11}_z - e^{12}_z;$ $e^1_z - e^2_z + e^3_z - e^4_z + e^9_z - e^{10}_z + e^{11}_z - e^{12}_z;$
4	$e^1_x + e^2_x + e^3_x + e^4_x + e^9_x + e^{10}_x + e^{11}_x + e^{12}_x;$ $e^1_y + e^2_y - e^3_y - e^4_y + e^9_y - e^{10}_y + e^{11}_y - e^{12}_y;$
5	$e^1_z - e^2_z - e^3_z + e^4_z + e^9_z - e^{10}_z - e^{11}_z + e^{12}_z;$ $e^1_z - e^2_z - e^3_z + e^4_z + e^9_z - e^{10}_z - e^{11}_z + e^{12}_z;$
6	$e^1_x + e^2_x - e^3_x - e^4_x + e^9_x - e^{10}_x + e^{11}_x - e^{12}_x;$ $e^1_y + e^2_y + e^3_y + e^4_y + e^9_y + e^{10}_y + e^{11}_y + e^{12}_y;$
7	$e^1_x - e^2_x + e^3_x - e^4_x + e^9_x - e^{10}_x + e^{11}_x - e^{12}_x;$ $e^1_y - e^2_y - e^3_y - e^4_y + e^9_y - e^{10}_y - e^{11}_y + e^{12}_y;$
8	$e^1_z + e^2_z + e^3_z + e^4_z + e^9_z + e^{10}_z + e^{11}_z + e^{12}_z;$ $e^1_z + e^2_z + e^3_z + e^4_z + e^9_z + e^{10}_z + e^{11}_z + e^{12}_z;$

**Возможные магнитные структуры для упорядоченного $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$
(пространственная группа $\text{P2}_1\text{am}$ (№ 26))**

τ	Направления магнитных моментов на ионах
1	$e_z^1 - e_z^2 + e_z^3 - e_z^4 + e_z^5 - e_z^6 + e_z^7 - e_z^8 + e_z^9 - e_z^{12}$
2	$e_x^1 + e_x^2 + e_x^3 + e_x^4 + e_x^5 + e_x^6 + e_x^7 + e_x^8 + e_x^9 + e_x^{12};$ $e_y^1 - e_y^2 + e_y^3 - e_y^4 + e_y^5 - e_y^6 + e_y^7 - e_y^8 + e_y^9 - e_y^{12}$
3	$e_z^1 + e_z^2 + e_z^3 + e_z^4 + e_z^5 + e_z^6 + e_z^7 + e_z^8 + e_z^9 + e_z^{12}$
4	$e_x^1 - e_x^2 + e_x^3 - e_x^4 + e_x^5 - e_x^6 + e_x^7 - e_x^8 + e_x^9 - e_x^{12};$ $e_y^1 + e_y^2 + e_y^3 + e_y^4 + e_y^5 + e_y^6 + e_y^7 + e_y^8 + e_y^9 + e_y^{12}$

Для данного случая также было построено магнитное представление и проведено разложение по неприводимым представлениям для каждой симметричной позиции для волнового вектора $k = 0$:

$$d_M^{(k=0)}(2b_1) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2b_2) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2b_3) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2a_1) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2a_2) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4.$$

В табл. 2 приведены базисные векторы, которые задают направления магнитных моментов на ионах. Как видно из таблицы, магнитные структуры для неприводимых представлений τ_1 , τ_2 , τ_4 и τ_3 подобны магнитным структурам для неприводимых представлений τ_2 , τ_4 , τ_6 и τ_8 для случая неупорядоченного кристалла, соответственно.

P112/m (№ 10). Еще одним вариантом упорядочения в рамках одной элементарной ячейки будет являться следующее упорядочение: ионы Ni расположены в положении 9 и 10, ионы Ge в положении 11 и 12 (рис. 3). В данном случае пространственная группа симметрии – P112/m (№ 10) [4]. В этом случае нет необходимости переходить в другую систему координат, поэтому все расчеты проведены в системе координат, соответствующей пространственной группе Pbam (№ 55). Разложение по неприводимым представлениям для каждой симметричной позиции для волнового вектора $k = 0$ имеет вид

$$d_M^{(k=0)}(2n_1) = \tau_1 + 2\tau_2 + 2\tau_3 + \tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2n_2) = \tau_1 + 2\tau_2 + 2\tau_3 + \tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(1b) = \tau_1 + 2\tau_3,$$

$$d_M^{(k=0)}(1h) = \tau_1 + 2\tau_3,$$

$$d_M^{(k=0)}(1d) = \tau_1 + 2\tau_3,$$

$$d_M^{(k=0)}(1c) = \tau_1 + 2\tau_3,$$

$$d_M^{(k=0)}(2m) = \tau_1 + 2\tau_2 + 2\tau_3 + \tau_4.$$

Базисные векторы, которые задают направления магнитных моментов на ионах, приведены в табл. 3. Как видно из таблицы, обоим представлениям (τ_1 и τ_3),

которые входят в разложение для каждой симметричной позиции, соответствует ферромагнитное упорядочение: либо вдоль оси c (неприводимое представление τ_1), либо в плоскости ab (неприводимое представление τ_3). Следовательно, если фазовый переход происходит одновременно во всей системе магнитных ионов, то переход из парамагнитного состояния возможен только в ферромагнитное состояние.

Pb2₁m (№ 26). Последний вариант упорядочения в рамках одной элементарной ячейки, когда магнитные ионы Ni занимают положения 9 и 11 (рис. 4), пространственная группа симметрии в этом случае Pb2₁m (№ 26). В данном случае, как и в предыдущем, также нет необходимости переходить в другую систему координат.

Разложение по неприводимым представлениям для каждой симметричной позиции для волнового вектора $k = 0$ следующее:

$$d_M^{(k=0)}(2b_1) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2b_2) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2b_3) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2a_1) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2a_2) = \tau_1 + 2\tau_2 + \tau_3 + 2\tau_4.$$

Базисные векторы приведены в табл. 4. Как видно из таблицы, базисные векторы для такого типа упорядочения подобны базисным векторам для упорядочения изображенного на рис. 2.

Анализ возможных магнитных структур для удвоенной вдоль оси c магнитной ячейки кристалла $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$. Так как упорядочение магнитных ионов может в значительной степени влиять на магнитную структуру кристалла, было выполнено рас-

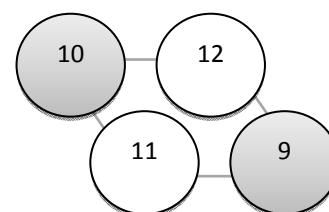


Рис. 3. Ионы 9 и 10 – Ni
(позиция 4g
в группе № 55)

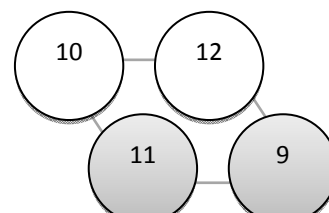


Рис. 4. Ионы 9 и 11 – Ni
(позиция 4g
в группе № 55)

смотрение различных вариантов упорядочения ионов Ni и Ge для удвоенной элементарной ячейки (вдоль кристаллографической оси c). В результате удвоения изменяется пространственная группа симметрии с Pbam (№ 55) на Pnnm (№ 58) [4].

P112/m (№ 10). Если магнитные ионы Ni упорядочить таким образом, как показано на рис. 6 (в положениях 9, 10, 23, 24), то пространственная группа симметрии становится P112/m (№ 10) [4]. Для выполнения расчетов удобнее выбрать другую систему координат. Переход от старой системы координат, соответствующей пространственной группе Pbam (№ 55), к новой осуществлен по следующему правилу:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

Для данного варианта упорядочения так же было получено разложение по неприводимым представлениям для волнового вектора $k = 0$ для каждой симметричной позиции:

$$d_M^{(k=0)}(4o_1) = 3\tau_1 + 3\tau_2 + 3\tau_3 + 3\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(4o_2) = 3\tau_1 + 3\tau_2 + 3\tau_3 + 3\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2m) = \tau_1 + 2\tau_2 + 2\tau_3 + \tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2n) = \tau_1 + 2\tau_2 + 2\tau_3 + \tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2i) = \tau_1 + \tau_2 + 2\tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(2l) = \tau_1 + \tau_2 + 2\tau_3 + 2\tau_4,$$

$$d_M^{(k=0)}(1d) = \tau_1 + 2\tau_3,$$

$$d_M^{(k=0)}(1f) = \tau_1 + 2\tau_3,$$

$$d_M^{(k=0)}(1c) = \tau_1 + 2\tau_3,$$

$$d_M^{(k=0)}(1e) = \tau_1 + 2\tau_3.$$

Базисные вектора, соответствующие каждому неприводимому представлению, представлены в табл. 6. В данном случае два представления (τ_1 и τ_3) входят в разложение для каждой симметричной позиции. Базисные векторы неприводимых представлений τ_1 и τ_3 составлены из векторов, соответствующих как случаю ферромагнитного упорядочения, так и случаю антиферромагнитного упорядочения. Кроме этого можно отметить тот факт, что для различных симметричных позиций базисный вектор может быть представлен линейной комбинацией двух, трех векторов.

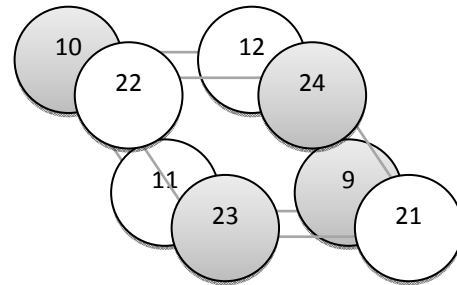


Рис. 6. Упорядочение магнитных ионов Ni, соответствующее группе P112/m

Таблица 3

Возможные магнитные структуры для упорядоченного $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$ (пространственная группа P112/m (№ 10))

τ	Направления магнитных моментов на ионах
1	$e_z^1 + e_z^2 + e_z^3 + e_z^4 + e_z^5 + e_z^6 + e_z^7 + e_z^8 + e_z^9 + e_z^{10}$
2	$e_x^1 - e_x^2 + e_x^3 - e_x^4 + e_x^5 - e_x^6 + e_x^7 - e_x^8 + e_x^9 - e_x^{10};$ $e_y^1 - e_y^2 + e_y^3 - e_y^4 + e_y^5 - e_y^6 + e_y^7 - e_y^8 + e_y^9 - e_y^{10}$
3	$e_x^1 + e_x^2 + e_x^3 + e_x^4 + e_x^5 + e_x^6 + e_x^7 + e_x^8 + e_x^9 + e_x^{10};$ $e_y^1 + e_y^2 + e_y^3 + e_y^4 + e_y^5 + e_y^6 + e_y^7 + e_y^8 + e_y^9 + e_y^{10}$
4	$e_z^1 - e_z^2 + e_z^3 - e_z^4 + e_z^5 - e_z^6 + e_z^7 - e_z^8 + e_z^9 - e_z^{10}$

Таблица 4

Возможные магнитные структуры для упорядоченного $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$ (пространственная группа P2₁am (№26))

τ	Направления магнитных моментов на ионах
1	$e_z^1 - e_z^2 + e_z^3 - e_z^4 + e_z^5 - e_z^6 + e_z^7 - e_z^8 + e_z^9 - e_z^{11}$
2	$e_x^1 - e_x^2 + e_x^3 - e_x^4 + e_x^5 - e_x^6 + e_x^7 - e_x^8 + e_x^9 - e_x^{11};$ $e_y^1 + e_y^2 + e_y^3 + e_y^4 + e_y^5 + e_y^6 + e_y^7 + e_y^8 + e_y^9 + e_y^{11}$
3	$e_z^1 + e_z^2 + e_z^3 + e_z^4 + e_z^5 + e_z^6 + e_z^7 + e_z^8 + e_z^9 + e_z^{11}$
4	$e_x^1 + e_x^2 + e_x^3 + e_x^4 + e_x^5 + e_x^6 + e_x^7 + e_x^8 + e_x^9 + e_x^{11};$ $e_y^1 - e_y^2 + e_y^3 - e_y^4 + e_y^5 - e_y^6 + e_y^7 - e_y^8 + e_y^9 - e_y^{11}$

**Возможные магнитные структуры для упорядоченного $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$
(пространственная группа $\text{Pn}2_1\text{m}$ (№ 31))**

τ	Направления магнитных моментов на ионах
1	$e^1_x + e^2_x - e^3_x - e^4_x + e^5_x - e^6_x - e^{13}_x - e^{14}_x + e^{15}_x + e^{16}_x - e^{17}_x + e^{18}_x$; $e^{11}_y + e^{12}_y + e^{13}_y + e^{14}_y + e^{15}_y + e^{16}_y - e^{17}_y - e^{18}_y$; $e^{11}_z + e^{12}_z - e^{13}_z - e^{14}_z + e^{15}_z - e^{16}_z + e^{17}_z + e^{18}_z$
2	$e^1_x + e^2_x - e^3_x - e^4_x + e^5_x - e^6_x + e^7_x + e^8_x + e^9_x - e^{12}_x + e^{13}_x + e^{14}_x - e^{15}_x - e^{16}_x + e^{17}_x - e^{18}_x$; $e^{11}_y + e^{12}_y + e^{13}_y + e^{14}_y + e^{15}_y + e^{16}_y + e^{17}_y + e^{18}_y$; $e^{11}_z + e^{12}_z - e^{13}_z - e^{14}_z + e^{15}_z + e^{16}_z - e^{17}_z + e^{18}_z$
3	$e^1_x + e^2_x + e^3_x + e^4_x + e^5_x + e^6_x + e^7_x + e^8_x + e^9_x + e^{12}_x + e^{13}_x + e^{14}_x + e^{15}_x + e^{16}_x + e^{17}_x + e^{18}_x$; $e^{11}_y + e^{12}_y - e^{13}_y - e^{14}_y + e^{15}_y + e^{16}_y + e^{17}_y + e^{18}_y$; $e^{11}_z + e^{12}_z + e^{13}_z + e^{14}_z + e^{15}_z + e^{16}_z - e^{17}_z - e^{18}_z$
4	$e^1_x + e^2_x + e^3_x + e^4_x + e^5_x + e^6_x - e^{13}_x - e^{14}_x - e^{15}_x - e^{16}_x - e^{17}_x - e^{18}_x$; $e^{11}_y + e^{12}_y + e^{13}_y + e^{14}_y + e^{15}_y + e^{16}_y - e^{17}_y - e^{18}_y$; $e^{11}_z + e^{12}_z + e^{13}_z + e^{14}_z + e^{15}_z + e^{16}_z + e^{17}_z + e^{18}_z$

Таким образом, в ходе проделанной работы с помощью симметричного анализа были построены возможные магнитные структуры для полностью неупорядоченного и различных случаев упорядочения магнитных ионов кристалла $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$. Как показывают результаты рентгеновских исследований кристаллической структуры $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$, упорядочения Ni и Ge в позиции 4g даже после длительного отжига не наблюдается, магнитные ионы в позиции 4g располагаются случайным образом. Несмотря на то, что то Ni и Ge распределены равномерно, возможно образование локального (ближнего) порядка в небольших областях кристалла. В этом случае различные области могут иметь несколько различную магнитную структуру. Как показали результаты расчета, если упорядочение происходит в рамках одной кристаллографической ячейки, то направления магнитных моментов либо лежат в плоскости ab, либо направлены вдоль оси c. В случае удвоенной ячейки различные типы упорядочения магнитных ионов дают более сложную картину: для некоторых представлений в этом случае магнитный момент для некоторых ионов имеет все три компоненты. Кроме этого, в ряде случаев при единственном фазовом переходе магнитоупорядоченная структура

может быть только ферромагнитной или наоборот только антиферромагнитной. Вероятнее всего реальная магнитная структура исследуемого соединения довольно сложная и может зависеть от условий роста кристалла (поскольку может изменяться распределение магнитных ионов в позиции 4g). Полученные в данной работе результаты помогут при анализе и интерпретации экспериментальных данных.

Библиографические ссылки

1. Ковалев О. В. Неприводимые представления пространственных групп : науч. изд. Киев : Изд-во АН УССР, 1961.
2. Изюмов Ю. А., Найш В. Е., Озеров Р. П. Нейтронография магнетиков : науч. изд. М. : Атомиздат, 1981.
3. Толедано Ж.-К.; Толедано П. Теория Ландау фазовых переходов : науч. изд. М. : Мир. 1994.
4. International Tables for Crystallography (2006). Vol. A. : sci. ed. / edit. Theo Hahn – Dordrecht (Netherlands): Springer, 2005.

© Назаренко И. И., Софронова С. Н., 2013

УДК 519.62

МОДАЛЬНЫЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ БАЛОК, ПОДАТЛИВЫХ ПРИ ТРАНСВЕРСАЛЬНОМ СДВИГЕ

В. А. Нестеров

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: gorkolya@mail.ru

Рассматривается задача о собственных колебаниях балки с низкой трансверсальной сдвиговой жесткостью. На основе теории пластин Рейсснера-Мидлина разработана конечно-элементная модель, в которой в качестве узловых неизвестных фигурируют углы трансверсального сдвига. Представлены результаты модальных расчетов изотропных, трехслойных и композитных балок при учете неклассических граничных условий.

Ключевые слова: балка, собственные колебания, трансверсальный сдвиг, метод конечных элементов.

MODAL FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SHEAR FLEXIBLE BEAMS

V. A. Nesterov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: gorkolya@mail.ru

The author considers a problem of free oscillations of a beam with low value of transverse shear stiffness. On the base of Reissner-Midlin plate theory, the finite element of a shear flexible beam is developed. There are transverse shear strains among the basic kinematic nodal variables. The urgency of the model is shown by test modal analysis of beams. Vibrations of sandwich beams and thick layered composite beams under non-classical boundary conditions are investigated.

Keywords: beam, free vibrations, transverse shear strains, finite element method.

Композиционные материалы часто используются в производстве ракетно-космической техники, поскольку они, обладая высокими удельными механическими свойствами, позволяют изготавливать конструкции с большой степенью весового совершенства. Для композитов характерна низкая трансверсальная сдвиговая жесткость. Эту особенность поведения композитов необходимо учитывать при проектировании и расчете. Математическая модель при этом усложнится по сравнению с той, что используется при расчете конструкций из традиционных материалов.

Рассматривается задача о собственных колебаниях балок, податливых при трансверсальном сдвиге. Решение выполняется с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Математическая модель базируется на теории пластин Рейсснера-Мидлина [1; 2]. Для вывода матриц жесткости и инерции используется вариационный подход. Для этого выражение полной энергии конечного элемента колеблющейся балки варьируется по узловым компонентам, среди которых присутствуют осредненные по высоте сечения углы трансверсального сдвига. Разработанная конечно-элементная модель протестирована на примерах решения классических задач. Ее актуальность показана расчетами, выполненными для монолитных изотропных балок с низкой трансверсальной сдвиговой жесткостью, для трехслойных балок с податливым заполнителем, а также для балок, изготовленных из однонаправленного композита (ортотропная модель). Частоты и формы собственных колебаний подтверждаются конечно-элементными решениями в среде пакета COSMOS/M, где эти задачи рассматривались в более строгой (двумерной) постановке.

Исследуемая конечно-элементная модель допускает описание граничных условий неклассического вида, когда на торцах балки регламентируется поведение углов трансверсального сдвига. Показано, что для некоторых типов граничных условий задача о собственных колебаниях балки не может быть решена при использовании классических расчетных моделей.

Получим разрешающие уравнения для задачи о свободных поперечных колебаниях балки с низкой трансверсальной сдвиговой жесткостью. Задачу будем решать с помощью МКЭ, поэтому сначала необходимо записать выражение энергетического функционала. Полная энергия колеблющейся балки скла-

дывается из потенциальной энергии деформации и кинетической энергии движения:

$$\tilde{E} = \tilde{U} + \tilde{T}. \quad (1)$$

Здесь

$$\tilde{U} = \frac{1}{2} \int \int \int_{(V)} (\tilde{\sigma}_x \tilde{e}_x + \tilde{\sigma}_z \tilde{e}_z + \tilde{\tau}_{xz} \tilde{e}_{xz}) dx dy dz,$$

$$\tilde{T} = \frac{1}{2} \int \int \int_{(V)} \rho(x, y, z) v^2 dx dy dz, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала в точке с координатами (x, y, z) ; v – скорость движения этой точки тела; V – объем тела.

Последовательно применяя гипотезы о поведении балки с низкой трансверсальной сдвиговой жесткостью [3], вместо (1) получим

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_0^l \left(N \frac{du}{dx} + M \frac{d\theta}{dx} + Q\psi \right) dx - \\ & - \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^l \left\{ B_p (u^2 + w^2) + 2C_p u \left(\psi - \frac{dw}{dx} \right) + D_p \left(\psi - \frac{dw}{dx} \right)^2 \right\} \times \\ & \times dx = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где N , M , Q – внутренние балочные усилия (N – продольная сила, M – изгибающий момент, Q – поперечная сила), вычисляемые по формулам

$$\begin{aligned} N &= B \frac{du}{dx} + C \left(\frac{d\psi}{dx} - \frac{d^2 w}{dx^2} \right), \\ M &= C \frac{du}{dx} + D \left(\frac{d\psi}{dx} - \frac{d^2 w}{dx^2} \right), \quad Q = K\psi, \end{aligned} \quad (4)$$

где B_p , C_p , D_p – параметры, характеризующие инерционные свойства

$$\begin{aligned} B_p &= \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-s}^{h-s} \rho dy dz, \quad C_p = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-s}^{h-s} \rho z dy dz, \\ D_p &= \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-s}^{h-s} \rho z^2 dy dz. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь h и b – высота и ширина сечения балки соответственно.

Перейдем теперь непосредственно к формированию матрицы жесткости балочного конечного элемента. Будем полагать, что прогиб изменяется по кубическому закону вдоль длины элемента, а угол сдвига ψ и продольное перемещение u – по линейному закону:

$$w(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 x^3, \quad \psi(x) = \alpha_5 + \alpha_6 x, \\ u(x) = \alpha_7 + \alpha_8 x. \quad (6)$$

Введем в рассмотрение вектор основных кинематических переменных

$$\delta = \left\{ w \quad \frac{dw}{dx} \quad \psi \quad u \right\}^T. \quad (7)$$

Вектор узловых кинематических параметров произвольного элемента балки представим в следующем виде:

$$\delta_e = \left\{ w_1 \left(\frac{dw}{dx} \right)_1 \quad \psi_1 \quad u_1 \quad w_2 \left(\frac{dw}{dx} \right)_2 \quad \psi_2 \quad u_2 \right\}^T. \quad (8)$$

Следуя вариационному подходу к МКЭ, получим систему уравнений для произвольного балочного элемента, которая в матричном представлении имеет следующий вид:

$$\mathbf{K}_e \delta_e - \omega^2 \mathbf{S}_e \delta_e = 0, \quad (9)$$

где $\mathbf{K}_e$ и $\mathbf{S}_e$ – матрица жесткости и матрица инерциальных параметров балочного элемента балочного элемента со следующими ненулевыми компонентами:

$$k_{11} = 12 \frac{D}{l^3}, \quad k_{12} = 6 \frac{D}{l^2}, \quad k_{15} = -12 \frac{D}{l^3}, \quad k_{16} = 6 \frac{D}{l^2}, \\ k_{22} = 4 \frac{D}{l}, \quad k_{23} = -\frac{D}{l}, \quad k_{24} = -\frac{C}{l}, \quad k_{25} = -6 \frac{D}{l^2}, \\ k_{26} = 2 \frac{D}{l}, \quad k_{27} = \frac{D}{l}, \quad k_{28} = \frac{C}{l}, \quad k_{33} = \frac{D}{l} + \frac{Kl}{3}, \quad k_{34} = \frac{C}{l}, \\ k_{36} = \frac{D}{l}, \quad k_{37} = -\frac{D}{l} + \frac{Kl}{6}, \quad k_{38} = -\frac{C}{l}, \quad k_{44} = \frac{B}{l}, \\ k_{46} = \frac{C}{l}, \quad k_{47} = -\frac{C}{l}, \quad k_{48} = -\frac{B}{l}, \quad k_{55} = 12 \frac{D}{l^3}, \\ k_{56} = -6 \frac{D}{l^2}, \quad k_{66} = 4 \frac{D}{l}, \quad k_{67} = -\frac{D}{l}, \quad k_{68} = -\frac{C}{l}, \\ k_{77} = \frac{D}{l} + \frac{Kl}{3}, \quad k_{78} = \frac{C}{l}, \quad k_{88} = \frac{B}{l}, \\ s_{11} = \frac{13B_p l^2 + 42D_p}{35l}, \quad s_{12} = \frac{11B_p l^2}{210} + \frac{D_p}{10}, \quad s_{13} = \frac{D_p}{2}, \\ s_{14} = \frac{C_p}{2}, \quad s_{15} = \frac{3(3B_p l^2 - 28D_p)}{70l}, \quad s_{16} = -\frac{13B_p l^2}{420} + \frac{D_p}{10}, \\ s_{17} = \frac{D_p}{2}, \quad s_{18} = \frac{D_p}{2}, \quad s_{19} = \frac{C_p}{2}, \quad s_{22} = \frac{1}{105} B_p l^3 + \frac{2}{15} D_p l,$$

$$s_{23} = -\frac{D_p l}{12}, \quad s_{24} = -\frac{C_p l}{12}, \quad s_{25} = \frac{13B_p l^2}{420} - \frac{D_p}{10}, \\ s_{26} = -\frac{1}{140} B_p l^3 - \frac{1}{30} D_p l, \quad s_{27} = \frac{D_p l}{12}, \quad s_{28} = \frac{C_p l}{12}, \\ s_{33} = \frac{D_p l}{3}, \quad s_{34} = \frac{C_p l}{3}, \quad s_{35} = -\frac{D_p}{2}, \quad s_{36} = \frac{D_p l}{2}, \\ s_{37} = \frac{D_p l}{6}, \quad s_{38} = \frac{C_p l}{6}, \quad s_{44} = \frac{B_p l}{3}, \quad s_{45} = -\frac{C_p}{2}, \\ s_{46} = \frac{C_p l}{12}, \quad s_{47} = \frac{C_p l}{6}, \quad s_{48} = \frac{B_p l}{6}, \quad s_{55} = \frac{13B_p l^2 + 42D_p}{35l}, \\ s_{56} = -\frac{11B_p l^2}{210} - \frac{D_p}{10}, \quad s_{57} = -\frac{D_p}{2}, \quad s_{58} = -\frac{C_p}{2}, \\ s_{66} = \frac{1}{105} B_p l^3 + \frac{2}{15} D_p l, \quad s_{67} = -\frac{D_p l}{12}, \quad s_{68} = -\frac{C_p l}{12}, \\ s_{77} = \frac{D_p l}{3}, \quad s_{78} = \frac{C_p l}{3}, \quad s_{88} = \frac{B_p l}{3}.$$

С помощью матриц $\mathbf{K}_e$ и $\mathbf{S}_e$ формируются глобальные матрицы жесткости и инерции $\mathbf{K}_\Sigma$ и $\mathbf{S}_\Sigma$, фигурирующие в глобальных уравнениях состояния

$$\mathbf{K}_\Sigma \Delta - \omega^2 \mathbf{S}_\Sigma \Delta = 0, \quad (10)$$

где глобальный вектор узловых неизвестных имеет вид

$$\Delta = \{\delta_1 \quad \delta_2 \quad \dots \quad \delta_i \quad \dots \quad \delta_{n+1}\}^T, \quad (11)$$

δ_i – вектор узловых неизвестных i -го узла

$$\delta_i = \left\{ w_i \left(\frac{dw}{dx} \right)_i \quad \psi_i \quad u_i \right\}^T.$$

Описанный алгоритм вывода матрицы жесткости и матрицы инерции реализован в специальной программе формирования фундаментальных матриц и векторов теории МКЭ, предназначенных для расчета балок, податливых при трансверсальном сдвиге [4].

Выполним тестовое решение для стальной ($E = 210$ ГПа, $\mu = 0,3$, $\rho = 7800$ кг/м³) балки длиной 1 м, с прямоугольным поперечным сечением ($h = 1$ см, $b = 1$ мм). Будем полагать, что координатная ось X проходит через центры тяжести сечений. В этом случае смешанные жесткости (C), фигурирующие в матрице жесткости элемента $\mathbf{K}_e$, и параметр инерции (C_p), присутствующий в матрице $\mathbf{S}_e$, равны нулю.

Сначала в нашем КЭ расчете зададим граничные условия свободного опирания, причем углы сдвига ψ на торцах не фиксируются:

$$\text{при } x = 0: w = 0, u = 0, \quad \text{при } x = L: w = 0. \quad (12)$$

Результат сравним с классическим решением, определяемым по формуле

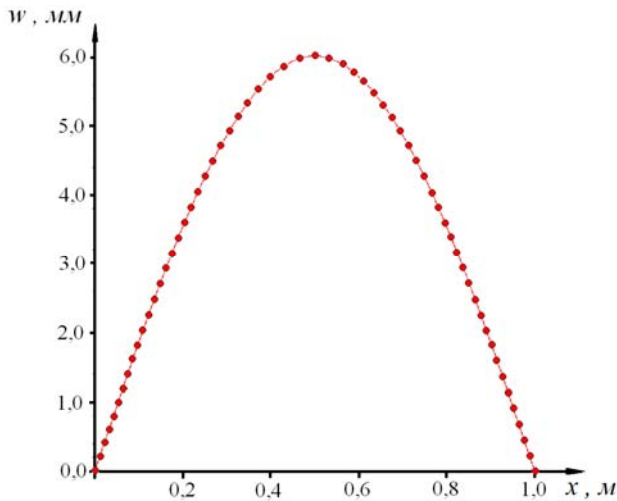
$$\omega_i = \frac{i^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (13)$$

где J – момент инерции сечения.

С помощью программы [5] решена обобщенная задача на собственные значения для 50-узловой моде-

ли стальной балки длиной 1 м с прямоугольным поперечным сечением ($h = 1$ см, $b = 1$ мм) и получено значение первой круговой частоты, равное 147,811 (рад/с). Вычисленное по формуле (13) значение равно 147,833 (рад/с). Форма колебаний при этой частоте показана на рисунке.

Представлены первые пять частот собственных колебаний стальной балки, определенные по нашей модели, вычисленные по формуле (13) и найденные в результате решения в пакете COSMOS/M с использованием элементов PLANE2D (табл. 1). Почти идеальное совпадение по частотам подтверждает правильность рассматриваемого здесь подхода. Совпадение имеет место и по формам колебаний. Отметим, что результаты модального анализа в пакете COSMOS/M выдаются в виде циклической частоты f , измеряемой в Гц (с^{-1}) и связанной с круговой частотой формулой $\omega = 2\pi f$.



Первая форма колебаний балки

Частоты собственных колебаний для первых пяти мод

Таблица 1

Номер моды	Тестируемое решение	Аналитическое решение	Решение в пакете COSMOS/M
1	147,811	147,833	147,809
2	590,982	591,332	590,956
3	1 328,730	1 330,497	1 328,605
4	2 359,758	2 365,328	2 359,361
5	3 682,269	3 695,826	3 681,293

Важно отметить, что в данном случае частоты первых мод колебаний являются первыми в списке собственных значений задачи, т. е. наименьшими.

Выполним модальный анализ, уменьшив в 100 раз (по сравнению с предыдущим расчетом) жесткость балки при трансверсальном сдвиге. Все остальные параметры жесткости, размеры и граничные условия оставим без изменения. Результаты решения по нашей модели представлены списком первых пяти собственных значений задачи, расположенных во втором столбце (табл. 2). Здесь же для сравнения приводится

решение (табл. 2, третий столбец), выполненное в пакете COSMOS/M, в котором для учета уменьшенного параметра трансверсальной жесткости задействуется опция ортотропных свойств материала (для элементов PLANE2D). При этом фактически уменьшается соответствующий модуль сдвига в списке механических свойств материала. Вновь отмечаем хорошее совпадение результатов. Подчеркнем необходимость учета трансверсального сдвига в модальном анализе. Сравнение соответствующих данных (см. табл. 1 и 2) показывает заметное расхождение частот собственных колебаний, определенных с учетом трансверсального сдвига, и теми же величинами, вычисленными по классической формуле, где этот эффект не принимается во внимание.

Выполнено решение задачи о собственных колебаниях балки с шарнирно-опертыми концами, на которых зафиксирован угол трансверсального сдвига. В этом случае рассматривается разрешающая система алгебраических уравнений со следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0: w = 0, u = 0, \psi = 0, \\ \text{при } x = L: w = 0, \psi = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Результаты решения (первые пять частот) приведены в четвертом столбце (табл. 2). Они показывают, что для рассматриваемой здесь шарнирно-опертой балки (с данным набором геометрических и механических параметров) расхождение в собственных значениях, определенных по двум моделям (с фиксацией угла ψ на торцах и без такового), невелико. Тем не менее качественное расхождение — верное: фиксация угла ψ на торцах делает балку более жесткой, что отражается в повышении величин собственных частот.

Таблица 2

Частоты колебания шарнирно-опертой балки

Номер моды	Торцы со свободным сдвигом	Решение в пакете COSMOS/M	Торцы с фиксированным сдвигом
1	146,271	146,058	146,308
2	567,477	564,397	568,005
3	1 218,091	1 204,820	1 220,416
4	2 040,959	2 006,992	2 047,117
5	2 982,133	2 915,593	2 994,430

Параметры инерции балки в данном случае для прямоугольного сечения с шириной b и высотой h определяются следующим образом:

$$B_p = \rho b h, \quad C_p = 0, \quad D_p = \rho \frac{b h^3}{12}.$$

Рассмотрим трехслойную балку с податливым заполнителем. Решим задачу о ее собственных колебаниях. Назначим следующие геометрические параметры: длина — 1 м, толщина несущих слоев — 1 мм, толщина слоя заполнителя — 3 см. Материал несущих слоев — сталь ($E = 210$ ГПа, $\mu = 0,28$, $\rho = 7\,700$ кг/м³). Изотропный материал заполнителя обладает модулем сдвига $G_{\text{зап}} = 2,9$ МПа. С помощью программы [6] получены результаты решения задачи на собственные

значения при ширине сечения в 1 мм (табл. 3). Параметры инерции трехслойной балки вычисляются по формулам

$$B_p = (2\rho_n h_n + \rho_z h_z) b, \quad C_p = 0,$$

$$D_p = \left(\rho_n (H^3 - h_z^3) + \rho_z h_z^3 \right) \frac{b}{12},$$

где ρ_n и ρ_z – плотности материалов несущих слоев и заполнителя; h_n и h_z – толщины несущих слоев и слоя заполнителя; H – общая толщина пакета, $H = 2 h_n + h_z$.

Таблица 3

Частоты колебания трехслойной шарнирно-опертой балки

Номер моды	Торцы со свободным сдвигом	Решение в пакете COSMOS/M	Торцы с фиксированным сдвигом
1	20,99	20,388	21,220
2	43,304	42,278	43,805
3	65,346	64,473	66,119
4	87,312	87,22	88,341
5	109,248	111,049	110,555

Для сравнения приводится результат (табл. 3, третий столбец) решения задачи в пакете COSMOS/M, где трехслойная конструкция моделировалась элементами PLANE2D (заполнитель) и BEAM2D (несущие слои).

Хорошее совпадение частот собственных колебаний (табл. 3), вычисленных с помощью двух разных моделей, подтверждает правильность разрабатываемого нами подхода. Здесь же приводятся результаты расчета для модели с фиксированным сдвигом на торцах (см. табл. 3, четвертый столбец). Небольшое отличие частот для балок с фиксацией сдвига и без такового характерно для граничных условий шарнирного опирания.

Выполнен модальный расчет трехслойной конструкции в пакете COSMOS/M с моделированием балки элементами слоистой пластины SHELL4L. На торцах – условия шарнирного опирания: слева – неподвижный шарнир, справа – подвижный в направлении продольной оси. Ширина сечения балки – 50 мм. Остальные размеры и механические свойства материалов такие же, как в балке предыдущего расчета.

Результаты расчетов (табл. 4) сравниваются с данными, определенными по нашей модели. Как видим, имеется заметное расхождение, что свидетельствует о том, что в модели пакета COSMOS/M не учитываются рассматриваемые нами эффекты. В данном случае большего доверия заслуживают наши результаты, поскольку они почти точно совпадают с решением, полученным в том же пакете COSMOS/M при строгом моделировании поведения заполнителя (см. табл. 3).

Рассмотрим трехслойную балку с граничными условиями жесткого защемления торцов.

$$\text{при } x = 0 \text{ и при } x = L: w = 0,$$

$$u = 0, \psi = 0, dw/dx = 0. \quad (15)$$

Сохраним геометрические параметры предыдущей задачи: длина – 1 м, толщина несущих слоев – 1 мм,

толщина слоя заполнителя – 3 см, ширина сечения – 1 мм. Материал несущих слоев – сталь ($E = 210$ ГПа, $\mu = 0,28$, $\rho = 7\,700$ кг/м³). Модуль сдвига изотропного материала заполнителя примем $G_{\text{зап}} = 290$ МПа.

Таблица 4

Частоты колебания трехслойной полосы

Номер моды	Торцы со свободным сдвигом	Решение в пакете COSMOS/M (SHELL4L)
1	20,964	22,227
2	43,292	46,028
3	65,338	69,487
4	87,306	92,829
5	109,243	116,097

Рассмотрим результаты решения задачи (табл. 5). Для сравнения приводятся частоты (см. табл. 5, третий столбец), вычисленные с помощью пакета COSMOS/M, где трехслойная конструкция моделировалась элементами PLANE2D (заполнитель) и BEAM2D (несущие слои). Защемление торцов обеспечено фиксацией угловых узлов на краях. Вновь следует отметить весьма хорошее совпадение и в количественном (табл. 5) и в качественном отношении результатов, полученных по нашей модели и в пакете COSMOS/M.

Выполнен модальный расчет для балки с защемленными торцами, на которых, однако, освобожден угол сдвига. Значения частот собственных колебаний показаны в предпоследнем столбце табл. 5. Они существенно расходятся с соответствующими величинами, вычисленными для жестко защемленной балки (табл. 5, второй столбец). Следовательно, в модальном расчете балки со вторым видом защемления для точного определения частот и форм собственных колебаний требуется рассматриваемая в нашей работе модель (постановка).

Для сравнения выполнено решение задачи для балки с шарнирным опиранием торцов, где, кроме того, допущен сдвиг (см. табл. 5, последний столбец). Как видим, результаты отличаются от тех, что получены для защемленной балки со свободным сдвигом на торцах.

Последнее решение задачи об определении частот собственных колебаний защемленной (со свободным сдвигом на торцах) трехслойной балки выполнено для весьма податливого заполнителя $G_{\text{зап}} = 2,9$ МПа. Получены следующие величины пяти первых частот: $f_1 = 21,262$ Гц, $f_2 = 43,833$ Гц, $f_3 = 66,136$ Гц, $f_4 = 88,365$ Гц, $f_5 = 110,567$ Гц. Сравнивая эти значения с частотами колебания шарнирно-опертой балки со свободным сдвигом на торцах (см. табл. 4), можно заключить, что в случае достаточно малой жесткости балки при трансверсальном сдвиге защемление торцов со свободным сдвигом можно моделировать шарнирным опиранием (тоже со свободным сдвигом).

В заключение выполним модальный анализ монолитной балки, изготовленной из однонаправленного композита, например углепластика, у которого следующие актуальные для данной задачи механические

свойства: $E = 180$ ГПа, $G = 5$ ГПа и плотность $\rho = 1500$ кг/м³. Выполним серию расчетов для различных вариантов граничных условий. Получены резуль-

таты этих вычислений в виде первых пяти частот собственных колебаний (табл. 6).

Таблица 5

Частоты колебания трехслойной балки, зашеченной по торцам

Номер моды	Жесткое защемление торцов	Решение в пакете COSMOS/M	Зашемление со свободным сдвигом на торцах	Шарнирно-опертые торцы со свободным сдвигом
1	134,105	130,53	77,563	70,122
2	309,411	298,818	254,025	245,059
3	518,337	497,572	477,927	467,133
4	742,287	710,749	716,150	703,270
5	972,990	931,689	956,270	941,120

Таблица 6

Частоты колебания многослойной балки при различных вариантах закрепления торцов

Номер моды	Шарнирно-опертые торцы со свободным сдвигом		Шарнирно-опертые торцы с фиксированным сдвигом	Зашемление торцов	
	Авторская модель	COSMOS/M		фиксированный сдвиг	свободный сдвиг
1	49,598	49,587	49,599	111,787	96,267
2	197,494	197,335	197,521	305,515	269,699
3	441,062	440,279	441,197	592,381	533,552
4	776,122	773,732	776,538	966,163	884,950
5	1 197,208	1 191,62	1 198,192	1 420,876	1 319,846

Как и в предыдущих примерах, здесь рассматривались следующие варианты граничных условий: классическое шарнирное опирание со свободным трансверсальным сдвигом на торцах, шарнирное опирание с фиксацией сдвига на торцах, жесткое защемление торцов, зашемление со свободным сдвигом на торцах.

Здесь же приведены данные расчета, выполненного для балки с классическим шарнирным опиранием в пакете COSMOS/M, где монолитная композитная конструкция, колебания которой происходят в одной плоскости, моделируется элементами PLANE2D.

Как следует из представленных значений (см. табл. 6), имеется хорошее совпадение данных нашего расчета с результатами вычислений, выполненных в пакете. Напомним, что наше решение соответствует одномерной балочной модели, а расчеты в пакете COSMOS/M проводились с помощью двумерной модели, чтобы адекватно учесть поведение конструкции с низкой трансверсальной сдвиговой жесткостью.

Анализ представленных данных (см. табл. 6) подтверждает ранее сделанный вывод о том, что в общем случае модальный расчет композитных балок с неклассическими граничными условиями (шарнирно-опертые торцы с фиксированным сдвигом и защемление со свободным сдвигом на торцах) приводит к результатам, отличным от тех, которые получаются при классических вариантах этих граничных условий. Это обстоятельство подчеркивает актуальность разработанной модели.

В заключение сформулируем выводы.

1. Получен энергетический функционал для решения задачи о собственных колебаниях балок с низкой трансверсальной жесткостью.

2. Разработана конечно-элементная модель податливой при сдвиге балки, вектор узловых неизвестных которой включает углы трансверсального сдвига. Сформированы матрица жесткости и матрица инерции для соответствующего балочного элемента.

3. В результате проведенного численного исследования на примере расчета изотропных, ортотропных композитных и трехслойных балок показана актуальность разработанной модели при проведении модального анализа конструкций с низкой трансверсальной сдвиговой жесткостью, а также при учете граничных условий неклассического вида.

Библиографические ссылки

1. Reissner E. The Effect of Transverse Shear Deformation on the Bending of Elastic Plates // Trans. ASME. J. of Applied Mechanics. 1945. Vol. 12 (2). P. 69–77.
2. Midlin R. D. Influence of Rotary Inertia and Shear on Flexural Motions of Elastic Plates // Trans. ASME. J. of Applied Mechanics. 1951. Vol. 18. P. 31–38.
3. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988.
4. Комплекс программ для получения основных матриц и векторов теории МКЭ для конечных элементов балки, пластины и оболочки, податливых при трансверсальном сдвиге: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010611594 / 26.02.2010 / Нестеров В. А. Заяв. № 2009617627, 31.12.2009.
5. Конечно-элементное исследование НДС, устойчивости и собственных колебаний балки с учетом трансверсальной податливости: свидетельство о гос.

регистрации программы для ЭВМ № 2010611595 / 26.02.2010 / Нестеров В. А. Заяв. № 2009617628, 31.12.2009.

6. Исследование НДС, устойчивости и собственных колебаний трехслойной балки с податливым заполнителем с помощью МКЭ при учете трансвер-

сального сдвига в качестве узлового неизвестного: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010611781 / 09.03.2010 / Нестеров В. А. Заяв. № 2010610178, 18.01.2010.

© Нестеров В. А., 2013

УДК 512.54

СТРОЕНИЕ БЕСКОНЕЧНОЙ СИЛОВСКОЙ ПОДГРУППЫ В НЕКОТОРЫХ ГРУППАХ ШУНКОВА*

В. И. Сенашов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50. E-mail: sen1112home@mail.ru

Изучаются группы, введенные В. П. Шунковым в 1975 г., и названные в его честь группами Шункова в 2000 г. Используется методика исследования бесконечных групп, разработанная в красноярской школе по теории групп. Цель работы – установить строение бесконечной силовской 2-подгруппы в группе Шункова, не обладающей почти слойно конечной периодической частью, когда в группе нормализатор любой конечной нетривиальной подгруппы обладает почти слойно конечной периодической частью. Доказано, что если некоторая силовская 2-подгруппа такой группы бесконечна, то она является расширением квазициклической 2-группы при помощи обращающего автоморфизма. Этот результат найдет применение при изучении бесконечных групп с условиями конечности. Строение искомой бесконечной силовской 2-подгруппы полностью установлено.

Ключевые слова: группа, силовская подгруппа, инволюция, слойная конечность.

STRUCTURE OF THE INFINITE SYLOV SUBGROUP IN SOME SHUNKOV GROUPS

V. I. Senashov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia
Institute of Computational Modeling of Siberian Branch of RAS
ICM SB RAS Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russia

The author studies groups entered by V. P. Shunkov in 1975 and named in his honor Shunkov groups in 2000, for the study the author uses a technique of infinite groups, developed at Krasnoyarsk School on group theory. The aim of the work was to establish the structure of an infinite Sylow 2-subgroup in Shunkov that does not have an almost layer-finite periodic part, when the normalizer of any finite non-trivial subgroup has an almost layer-finite periodic part. The author proves that if a Sylow 2-subgroup of the group is infinite, then it is an extension of a quasi-cyclic 2-group by reversing automorphism. This result will be used in the study of infinite groups with finiteness conditions. The structure of the unknown infinite Sylow 2-subgroup was completely revealed.

Keywords: group, Sylow subgroup, involution, layer-finiteness.

Слойно конечные группы впервые появились без названия в статье С. Н. Черникова [1], а затем в его последующих публикациях за ними закрепилось название *слойно конечных групп*. Группа называется *слойно конечной*, если множество ее элементов любого данного порядка конечно. *Почти слойно конечные группы* – это расширения слойно конечных групп с помощью конечных групп. Класс почти слойно конечных групп значительно шире класса слойно конечных групп. В то время как только некоторые чер-

никовские группы слойно конечны, все черниковские группы являются почти слойно конечными.

Здесь мы изучаем группы с условием: нормализатор любой конечной нетривиальной подгруппы обладает почти слойно конечной периодической частью. Класс групп, удовлетворяющий этому условию, довольно широк. В нем содержатся свободные бернсайдовские группы нечетного периода ≥ 665 [2] и группы, построенные А. Ю. Олышанским [3].

Определение. Группа называется *группой Шункова*

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 10-01-00509) и гранта Министерства образования России (проект – алгебро-логические структуры и комплексный анализ с приложениями к передаче и защите информации).

ва, если для любой ее конечной подгруппы H в фактор-группе $N_G(H)/H$ любые два сопряженных элемента простого порядка порождают конечную подгруппу.

В настоящей работе доказывается следующая теорема.

Теорема. Пусть в группе Шункова G , не обладающей почти слойно конечной периодической частью, нормализатор любой нетривиальной конечной подгруппы обладает почти слойно конечной периодической частью. Если некоторая силовская 2-подгруппа группы G бесконечна, то она является расширением квазициклической 2-группы при помощи обращающего автоморфизма.

Заметим, что если группа Шункова удовлетворяет всем условиям теоремы, но обладает почти слойно конечной периодической частью, то бесконечная силовская 2-подгруппа может иметь самое разнообразное строение. В частности, в качестве бесконечной силовской 2-подгруппы может выступать любая черниковская 2-подгруппа. Результат находится в русле исследований классических объектов школы Шункова и найдет применение при изучении бесконечных групп с условиями конечности.

Ранее автором изучались периодические группы Шункова с условием почти слойной конечности нормализаторов конечных неединичных подгрупп [4] и группы Шункова с условием минимальности для не почти слойно конечных подгрупп [5; 6]. Группы Шункова с нормализаторами нетривиальных конечных подгрупп обладающих почти слойно конечной периодической частью, исследовались в классе групп без инволюций [7], при наличии в них сильно вложенной подгруппы с черниковской периодической частью [8], сильно вложенной почти слойно конечной подгруппы [9] и сильно вложенной подгруппы с почти слойно конечной периодической частью [10].

Необходимые определения и известные результаты, используемые в доказательстве. В этом пункте для удобства чтения статьи мы приведем необходимые определения и известные результаты, на которые в дальнейшем будем ссылаться как на предложения с соответствующим номером.

Определение. Элемент второго порядка называется инволюцией.

Определение. Элемент с конечным централизатором в группе G называется почти регулярным элементом группы G .

Определение. Элемент, который сопряжением при помощи некоторой инволюции переводится в обратный, называется строго вещественным относительно этой инволюции.

Определение. Если множество элементов конечного порядка в группе составляет подгруппу, то ее называют периодической частью этой группы.

Определение. Группа называется черниковской, если она либо конечна, либо является расширением прямого произведения конечного числа квазициклических групп с помощью конечной группы.

Определение. Группа обладает полной частью A , если A – абелева группа, порожденная всеми полными абелевыми подгруппами группы G , и G/A не обладает полными абелевыми подгруппами [11].

Определение. Подгруппа H группы G называется сильно вложенной в G , если H – собственная подгруппа группы G , содержащая инволюции, и $H \cap x^{-1}Hx$ не содержит инволюций для $x \in G \setminus H$.

Определение. Если произведение всех нормальных слойно конечных подгрупп группы слойно конечно, то будем его называть слойно конечным радикалом группы. Если группа F обладает слойно конечным радикалом, то мы будем обозначать его $R(F)$.

Определение. Группа G с инволюцией i называется T_0 -группой, если выполняются условия:

- (1) все подгруппы вида $\langle i, i^g \rangle$, $g \in G$, конечны;
- (2) силовские 2-подгруппы из G – циклические группы или обобщенные группы кватернионов;
- (3) централизатор $C_G(i)$ бесконечен и обладает конечной периодической частью;
- (4) нормализатор любой нетривиальной $\langle i \rangle$ -инвариантной локально конечной подгруппы из G либо содержится в $C_G(i)$, либо обладает периодической частью, являющейся группой Фробениуса с абелевым ядром и конечным неинвариантным множителем четного порядка;

(5) $C_G(i) \neq G$ и для всякого элемента $c \in G \setminus C_G(i)$, строго вещественного относительно i , т. е. $c^i = c^{-1}$, в $C_G(i)$ существует такой элемент s_c , что подгруппа $\langle c, s_c^{-1}cs_c \rangle$ бесконечна.

1. Всякая черниковская примарная группа обладает нетривиальным центром [12, теорема 1.6].

2. Пусть G – группа с инволюциями, i – некоторая ее инволюция, удовлетворяющие следующим условиям: 1) все подгруппы вида $\langle i, i^g \rangle$, $g \in G$, конечны; 2) в централизаторе $C_G(i)$ множество элементов конечных порядков конечно; 3) в группе G нормализатор любой нетривиальной $\langle i \rangle$ -инвариантной конечной подгруппы обладает периодической частью. Тогда либо G обладает почти нильпотентной периодической частью, либо G – T_0 -группа [13, теорема 1].

3. Локально конечная группа G тогда и только тогда почти слойно конечна, когда в G выполняется условие: нормализатор любой нетривиальной конечной подгруппы из G – почти слойно конечная группа [7, теорема 1].

4. Любая почти слойно конечная группа G обладает слойно конечным радикалом, который имеет конечный индекс в группе G [14, свойство 1].

5. Пусть группа Шункова содержит сильно вложенную подгруппу, обладающую почти слойно конечной периодической частью. Если в группе нормализатор любой нетривиальной конечной подгруппы обладает почти слойно конечной периодической частью, то сама группа обладает почти слойно конечной периодической частью [10, основная теорема].

6. В локально конечной группе с черниковскими примарными подгруппами силовские примарные подгруппы сопряжены [15, теорема 7].

7. Централизатор любого элемента из слойно конечного радикала почти слойно конечной группы

имеет конечный индекс в группе; индексы в группе централизаторов остальных элементов бесконечны [14, свойство 4].

8. В бесконечной локально конечной группе четверная подгруппа Клейна обладает инволюцией с бесконечным централизатором [16, теорема 2].

9. Каждая полная подгруппа почти слойно конечной группы G содержится в центре слойно конечного радикала группы G [14, свойство 7].

Доказательство основного результата. Пусть группа Шункова G не обладает почти слойно конечной периодической частью и нормализатор любой нетривиальной конечной подгруппы обладает почти слойно конечной периодической частью.

Рассуждения, аналогичные доказательству леммы 8 из [13] для групп без инволюций, показывают, что все примарные подгруппы из G являются черниковскими. Предположим, что в группе G имеется бесконечная силовская 2-подгруппа S . Обозначим через i некоторую инволюцию из центра подгруппы S группы G (такая найдется ввиду предложения 1). По условиям теоремы централизатор инволюции i в группе G обладает почти слойно конечной периодической частью C .

Предположим, что в централизаторе некоторой инволюции группы G множество элементов конечных порядков конечно. Тогда по условиям теоремы и предложению 2 либо G обладает почти нильпотентной периодической частью, либо G — T_0 -группа. Если периодическая часть группы G почти нильпотентна, то G обладает периодической нильпотентной нормальной подгруппой K конечного индекса в периодической части группы G . Так как K обладает нетривиальным центром $Z(K)$, то централизатор любого неединичного элемента из $Z(K)$ по условиям теоремы обладает почти слойно конечной периодической частью, очевидно, содержащей K . Тогда K почти слойно конечна, а вместе с ней почти слойно конечна и периодическая часть группы G как расширение почти слойно конечной группы при помощи конечной группы. Таким образом, в случае, когда периодическая часть группы G почти нильпотентна, теорема доказана. T_0 -группой группа G быть не может, так как в группе Шункова не выполняется условие (5) из определения T_0 -группы.

Итак, в дальнейшем будем предполагать, что в централизаторе произвольной инволюции из G множество элементов конечных порядков бесконечно. Включим C в максимальную почти слойно конечную подгруппу H . Такая максимальная подгруппа найдется по лемме Цорна и ввиду почти слойно конечности локально конечных подгрупп, удовлетворяющих условиям теоремы (предложение 3).

Обозначим через M нормализатор подгруппы H в группе G . По предложению 4 почти слойно конечная группа H обладает слойно конечным радикалом $R(H)$. Любой слой неединичных элементов из $R(H)$ представляет собой конечное инвариантное множество элементов. По лемме Дицмана из [17] он порождает конечную нетривиальную нормальную в $R(H)$ подгруппу, очевидно, являющуюся характеристической

в $R(H)$ и, следовательно, нормальной в M . Тогда по условиям теоремы группа M обладает почти слойно конечной периодической частью, которая ввиду максимальности подгруппы H совпадает с H .

Лемма 1. Пусть F, W — две различные бесконечные максимальные почти слойно конечные подгруппы группы G , $R(F)$ и $R(M)$ — их слойно конечные радикалы. Тогда $R(F) \cap R(W) = 1$.

Доказательство повторяет доказательство леммы 10 из [13] для групп без инволюций.

Лемма 2. Если для некоторого элемента a конечного порядка из M пересечение $C_G(a) \cap H$ бесконечно, то периодическая часть централизатора $C_G(a)$ содержится в M .

Доказательство повторяет доказательство леммы 11 из [13] для групп без инволюций.

Лемма 3. Если для некоторого элемента b конечного порядка из $H \cap H^g$ пересечения $C_G(b) \cap H$, $C_G(b) \cap H^g$ бесконечны, то $H = H^g$.

Доказательство повторяет доказательство леммы 3 из [8] для групп без инволюций.

Предположим, что централизаторы всех инволюций из M имеют бесконечные пересечения с H . В группе G нет сильно вложенных подгрупп с почти слойно конечной периодической частью по предложению 5. Значит, группа M не является сильно вложенной в группу G . Тогда для некоторого элемента g из множества $G \setminus M$ пересечение $M \cap M^g$ содержит инволюцию. По только что сделанному предположению, по условиям теоремы и лемме 2 группа H содержит бесконечную периодическую часть централизатора этой инволюции в группе G , аналогично получаем, что H^g также содержит бесконечную периодическую часть централизатора этой инволюции. Но тогда по лемме 3 $H = H^g$, что противоречит выбору элемента g .

Таким образом, в группе M найдется инволюция, централизатор которой в M обладает конечной периодической частью. Зафиксируем за этой инволюцией обозначение j .

Так как в локально конечной группе H с черниковскими примарными подгруппами силовские примарные подгруппы сопряжены по предложению 6, то можем выбрать инволюцию j из S .

Лемма 4. В максимальной почти слойно конечной подгруппе H из G все инволюции с бесконечными централизаторами в H порождают конечную подгруппу, которая содержится в $R(H)$.

Доказательство. Предположим, что это не так, и группа, порожденная инволюциями из H с бесконечными централизаторами в H , бесконечна. Так как H почти слойно конечна, то ввиду предложения 7 и леммы Дицмана в этом случае в H найдется инволюция k с бесконечным $C_H(k)$, для которой индекс $|H : C_H(k)|$ бесконечен. Обозначим через $\mathfrak{Z}$ класс инволюций из H , сопряженных с k в H . Для произвольного элемента $g \in G \setminus H$ рассмотрим подгруппу $H^g = g^{-1}Hg$ и ее подмножество $\mathfrak{K} = g^{-1}\mathfrak{Z}g$. Ввиду того что G является группой Шункова, любые две инволюции из множеств $\mathfrak{Z}$ и $\mathfrak{K}$ порождают конечные подгруппы. Тогда для произвольной фиксированной

инволюции x из $\mathfrak{Z}$ элементы $b_t = xt$ ($t \in \mathfrak{R}$) имеют конечные порядки.

Если для бесконечного подмножества $\wp$ из $\mathfrak{R}$ рядки элементов b_t , $t \in \wp$ нечетны, то по свойствам групп диэдра в (b_t) найдется элемент c_t со свойством $c_t^{-1}tc_t = x$. Так как t принадлежит $\wp \leq \mathfrak{R}$, то $t = g^{-1}rg$ для некоторой инволюции r из $\mathfrak{Z}$. Отсюда получим $c_t^{-1}g^{-1}rgc_t = x$. Обозначая $h_t = gc_t$, видим: $x \in h_t^{-1}Hh_t = H$. Инволюции x , r сопряжены с k в H и имеют бесконечные централизаторы в H . Отсюда централизатор инволюции x в H также бесконечен и по лемме 2 периодическая часть централизатора $C_G(x)$ содержится в $H \cap H$. Тогда по лемме 3 $H = H_t$ и $h_t \in H = N_G(H)$. Элемент g можно представить в виде $g = h_t c_t^{-1}$ ($t \in \wp$), тогда $Hg = H c_t^{-1}$ ($t \in \wp$).

Для двух различных инволюций t, w из $\wp$ соответствующие строго вещественные элементы c_t, c_w также различны. Иначе из их совпадения вытекало бы равенство $x = c_t^{-1}t c_t = c_w^{-1}w c_w$, что невозможно для различных инволюций t, w . По свойствам групп диэдра элемент $j_t = xc_t^{-1}$ из Hg есть инволюция. Множество таких инволюций по мощности совпадает с мощностью множества $\wp$ и, значит, бесконечно. В качестве представителя смежного класса Hg берем инволюцию $u = xc_t^{-1}$ для некоторого t из $\wp$. Тогда инволюцию j_t можно представить в виде $j_t = s_t k$ ($t \in \wp$), где s_t принадлежит H и является строго вещественным относительно инволюции k ввиду $(s_t k)^2 = (j_t)^2 = 1$ (отсюда $k^{-1}s_t k = s_t^{-1}$).

Очевидно, группа $Z = \langle s_t \mid t \in \mathfrak{R} \rangle$ бесконечна и ввиду вложения $Z \leq H$ группа Z почти слойно конечна. Инволюция u нормализует Z и не содержится в H . Включим почти слойно конечную периодическую часть нормализатора $N_G(Z)$ в максимальную почти слойно конечную подгруппу W группы G (это можно сделать по лемме Цорна ввиду почти слойной конечности локально конечных подгрупп, удовлетворяющих условиям теоремы (см. предложение 3)). Пересечение $H \cap W$ бесконечно (в нем содержится подгруппа Z). Отсюда по лемме 1 получаем совпадение $H = W$ и включение $u \in H$ вопреки выбору u .

Противоречие означает, что для любого элемента $x \in \mathfrak{Z}$ найдется бесконечное подмножество $\wp_x$ множества $\mathfrak{R}$ такое, что порядки элементов $b_t = xt$ ($t \in \wp_x$) четны. Обозначим через Ψ множество инволюций вида j_t из $\langle b_t \rangle$ ($t \in \mathfrak{U}_x$). По свойствам групп диэдра и лемме 2 $\Psi \leq H \cap H^g$. Ввиду максимальной H из бесконечности множества Ψ следовало бы по лемме 1 совпадение $H = H^g$, что противоречило бы выбору пары H, g . Следовательно, Ψ — конечное множество и, не нарушая общности рассуждений, будем считать, что оно состоит из одной инволюции j_x . По свойствам групп диэдра $\{x, \wp_x\} \leq C_G(j_x)$ и $\wp_x$ — бесконечное множество инволюций из H^g . По лемме 2 x принадлежит $C_G(j_x) \leq H^g$. Отсюда ввиду произвольности выбора инволюции x из бесконечного множества $\mathfrak{Z}$ получаем $\mathfrak{Z} \leq H \cap H^g$. Как и выше, в такой ситуации приходим к противоречию с выбором пары

H, g . Т. е. все инволюции с бесконечными централизаторами в H порождают конечную подгруппу, которая содержится в слойно конечном радикале $R(H)$ группы H по определению слойно конечного радикала и по предложению 2. Лемма доказана.

Лемма 5. В максимальной почти слойно конечной подгруппе H из G нет элементарной абелевой подгруппы 8-го порядка с почти регулярной инволюцией в H .

Доказательство. Пусть лемма неверна и F — элементарная абелева подгруппа восьмого порядка из H , k — ее почти регулярная в H инволюция.

Так как по предложению 8 в бесконечной локально конечной группе четверная подгруппа Клейна обладает инволюцией с бесконечным централизатором, то в F найдется инволюция с бесконечным централизатором в H . Обозначим ее через m . Так как $F = \langle m \rangle \times K$, где K — группа диэдра, то снова по тем же соображениям некоторая инволюция l из K также не является почти регулярной в H . Так как по лемме 4 инволюция m находится в конечном нормальном в H делителе H_m , а l , соответственно, в конечном нормальном в H делителе H_l , то их произведение ml также попадет в конечный нормальный делитель $H_m H_l$ и ml также имеет бесконечный централизатор в H . Таким образом, подгруппа $L = \langle m \rangle \times \langle l \rangle$ имеет бесконечный централизатор в H конечного индекса в H . Теперь рассмотрим максимальную почти слойно конечную в G подгруппу W , содержащую периодическую часть C_k централизатора $C_G(k)$. Очевидно $F \leq C_k \leq W$. Как и выше, найдем в $F = \langle k \rangle \times L$ подгруппу L_1 четвертого порядка с бесконечным централизатором в W конечного индекса в W , нетривиально пересекающуюся с L . Таким образом, пересечение $L \cap L_1$ содержит некоторую инволюцию, периодическая часть централизатора которой содержится в $H \cap W$. Так как периодическая часть централизатора любой инволюции в G бесконечна, то H, W пересекаются по бесконечной подгруппе и, значит, пересекаются нетривиально по своим слойно конечным радикалам. По лемме 1 $H = W$ и, учитывая конечность централизатора $C_H(k)$ и бесконечность централизатора $C_W(k)$, получаем противоречие. Лемма доказана.

Предположим, что полная часть $\tilde{S}$ группы S обладает больше чем одной инволюцией, и кроме i в $\tilde{S}$ нашлась инволюция l .

Напомним, что в S имеется почти регулярная в H инволюция j . Если $jlj = 1$, то $\langle i \rangle \times \langle l \rangle \times \langle j \rangle$ — элементарная абелева группа, существование которой противоречит лемме 5. Тогда $jlj = k \neq 1$.

Если $ik = l$, то поскольку $i, l \in \tilde{S}$ полной части группы S , мы можем выбрать элементы $l_1^2 = l, k_1^2 = k$ и одновременно $jlj = k_1$.

Тогда $jl_1 k_1 j = jl_1 j k_1 j = k_1 j l_1 j j = k_1 l_1$. Так как $l_1, k_1 \in \tilde{S}$, то $k_1 l_1 = l_1 k_1$ и $jl_1 k_1 j = l_1 k_1$, т. е. $l_1 k_1 \in C_H(j)$ и порядок элемента $l_1 k_1$ равен четырем. Продолжая рассуждения таким же способом, получаем элемент $l_2 k_2 \in C_H(j)$ порядка 8, элемент $l_3 k_3 \in C_H(j)$ порядка 16 и т. д. Противоречие с почти регулярностью инволюции j в группе H означает невозможность случая $ik = l$.

Остался случай, когда $ik \neq l$. Чтобы его исключить, заметим, что для инволюции $kl \neq i$ выполняется $ijklj = jkijl = jiljkk = lk$. Так как $l, k \in \tilde{S}$, то $kl = lk$ и тогда в S найдется элементарная абелева группа $\langle i \rangle \times \langle kl \rangle \times \langle j \rangle$, которая, как мы показали выше не может содержаться в S .

Таким образом, в полной части $\tilde{S}$ инволюция i единственна. Отсюда следует, что $\tilde{S}$ является квазициклической 2-группой.

Инволюция i является единственной центральной инволюцией в группе S , так как если бы в ней нашлась другая центральная инволюция z , то в H нашлась бы и элементарная абелева группа $\langle i \rangle \times \langle z \rangle \times \langle j \rangle$, существование которой противоречит лемме 5.

Завершение доказательства теоремы. Пусть k – некоторая инволюция из H , не сопряженная в M с инволюцией i и имеющая в H бесконечный централизатор. Класс инволюций, сопряженных с инволюцией k в группе G не может содержаться в подгруппе H , так как в этом случае подгруппа, порожденная этим классом, была бы почти слойно конечной подгруппой, инвариантной в группе G . Но в такой подгруппе всегда найдется конечная характеристическая подгруппа, нормализатор которой по условиям теоремы обладает почти слойно конечной периодической частью и совпадает с группой G , что невозможно. Тогда найдется инволюция $t = k^g \notin H$ (очевидно, в этом случае $g \notin M$). Аналогично найдется инволюция $u = i^f \notin H^g$. Рассмотрим группу $D = \langle u, t \rangle$.

В случае нечетности порядка элемента ut группа D была бы группой Фробениуса. По свойствам групп Фробениуса в D найдется элемент d такой, что $u^d = t$. Тогда $(i^f)^d = u^d = t = k^g$, что влечет $i = fdg^{-1}kgd^{-1}f^{-1}$. Согласно предположению, $gd^{-1}f^{-1} \notin M$.

Тогда пересечение $H \cap fdg^{-1}Hgd^{-1}f^{-1}$ содержит инволюцию i . По лемме 4 инволюции i, k содержатся в $R(H)$, тогда инволюция $i = fdg^{-1}kgd^{-1}f^{-1}$ содержится в $R(fdg^{-1}Hgd^{-1}f^{-1})$. Отсюда по лемме 1 получаем совпадение $H = fdg^{-1}Hgd^{-1}f^{-1}$, что противоречит выбору элемента $gd^{-1}f^{-1} \notin M = N_G(H)$.

Значит, ut – элемент четного порядка. Обозначим через w инволюцию из $\langle ut \rangle$. По свойствам групп диэдра w является центральной инволюцией в D и, следовательно, принадлежит H^g ввиду леммы 2 и бесконечности пересечения $C_G(t)$ с H^g (лемма 2 справедлива для групп H^g и M^g как для соответственно сопряженных с H и M).

Обозначим через S_1 силовскую 2-подгруппу из H^g , содержащую t и w . Так как в H^g все силовские 2-подгруппы сопряжены, то можно считать, не нарушая общности рассуждений, что i^g также принадлежит S_1 , причем $i^g \neq t = k^g$, иначе получили бы противоречие с предположением.

Инволюция w имеет конечный централизатор в H^g , так как иначе ввиду леммы 2 инволюция u попала бы в H^g вместе с бесконечной периодической частью централизатора $C_G(w)$, а это противоречит выбору инволюции u .

Рассмотрим максимальную элементарную абелеву подгруппу $R = \langle t \rangle \times \langle w \rangle$ из S_1 (ввиду леммы 5 в группе H^g нет элементарных абелевых подгрупп 8-го порядка, содержащих инволюцию w).

Инволюция i является единственной центральной инволюцией в группе S и, так как силовская 2-подгруппа S из H сопряжена с силовской 2-подгруппой S_1 из H^g (см. предложение 6) при помощи некоторого элемента x , то группа S_1 обладает единственной центральной инволюцией. Если эта центральная инволюция не t , то ввиду максимальной элементарной абелевой подгруппы R центральная инволюция из S_1 совпадает либо с w , либо с tw . В первом случае w централизует бесконечную подгруппу $S_1 < H^g$, что невозможно ввиду ее почти регулярности в H^g , а во втором случае снова tw имеет бесконечный централизатор в H^g по лемме 4 имеющий конечный индекс в H^g , аналогично $|H^g : C_G(t) \cap H^g| < \infty$, тогда подгруппа $R = \langle tw \rangle \times \langle t \rangle$ также имеет бесконечный централизатор в H^g . Отсюда и централизатор элемента w в группе H^g бесконечен, что противоречит почти регулярности w в H^g . Таким образом, инволюция t является единственной центральной инволюцией в группе S_1 . Тогда $i^x = t = k^g$, или $i = xg^{-1}kgx^{-1}$, причем $gx^{-1} \notin M$ по предположению. Тогда пересечение $H \cap xg^{-1}Hgx^{-1}$ содержит инволюцию $i = xg^{-1}kgx^{-1}$, снова, как и выше в такой ситуации для $i \in H \cap fdg^{-1}Hgd^{-1}f^{-1}$ получаем $H = xg^{-1}Hgx^{-1}$, что противоречит выбору элемента $gx^{-1} \notin M = N_G(H)$. Таким образом, все инволюции из H с бесконечными централизаторами в H сопряжены в M .

По предположению 4 группа H обладает слойно конечным радикалом $R(H)$, причем $\tilde{S}$ содержится в центре $Z(R(H))$ по предположению 9. Для произвольного элемента h из $M = N_G(H)$ подгруппа $\tilde{S}^h$ так же, как и $\tilde{S}$, является полной 2-подгруппой и также содержится в центре $Z(R(H))$ по предположению 9. Очевидно группа $\langle \tilde{S}, \tilde{S}^h \rangle$ является полной абелевой 2-группой и по теореме 9.1.6 из [18] разлагается в прямое произведение квазициклических 2-подгрупп. Как мы показали выше, $\tilde{S}$ является квазициклической 2-группой, тогда ввиду сопряженности (см. предложение 6) силовских 2-подгрупп в H группа $\langle \tilde{S}, \tilde{S}^h \rangle$ также является квазициклической 2-группой и $\tilde{S} = \tilde{S}^h$. Таким образом, подгруппа $\tilde{S}$ нормальна в M . Если бы $C_S(\tilde{S}) \neq \tilde{S}$, то $\tilde{S}$ как полная абелева группа выделялась бы прямым множителем в некоторой большей абелевой подгруппе из $C_S(\tilde{S})$. Но тогда в $C_S(\tilde{S}) \setminus \tilde{S}$ нашлась бы инволюция t с бесконечным централизатором в S . По доказанному выше, все инволюции из S с бесконечными централизаторами в H сопряжены в M , т. е. инволюция t из $C_S(\tilde{S}) \setminus \tilde{S}$ сопряжена с инволюцией $i \in \tilde{S}$. Противоречие с нормальностью $\tilde{S}$ в M . Следовательно, $C_S(\tilde{S}) = \tilde{S}$.

Так как подгруппа $\tilde{S}$ нормальна в S , то $j \in N_G(\tilde{S})$. Тогда j индуцирует в $\tilde{S}$ нетривиальный автоморфизм,

переводящий каждый элемент из S в обратный. Ввиду строения группы автоморфизмов квазициклической группы других автоморфизмов у $\tilde{S}$ нет. Таким образом, $S = \tilde{S} \lambda(j)$ и инволюция j сопряжением переводит каждый элемент из S в обратный. Теорема доказана.

Мы полностью изучили строение бесконечной силовой 2-подгруппы в группах Шункова, не обладающих почти слойно конечной периодической частью, при условии почти слойной конечности периодических частей нормализаторов конечных нетривиальных подгрупп. Доказано, что если некоторая силовая 2-подгруппа такой группы бесконечна, то она является расширением квазициклической 2-группы при помощи обращающего автоморфизма. Этот результат найдет применение при изучении бесконечных групп с условиями конечности.

Библиографические ссылки

1. Черников С. Н. К теории бесконечных специальных p -групп // Докл. АН СССР. 1945. С. 71–74.
2. Адян С. И. Проблема Бернсайда и тождества в группах. М.: Наука, 1975.
3. Ольшанский А. Ю. Геометрия определяющих соотношений в группах. М.: Наука, 1989.
4. Сенашов В. И. Почти слойная конечность периодической группы без инволюций // Укр. мат. журн. Т. 51(11). 1999. С. 1529–1533.
5. Сенашов В. И. Группы с условием минимальности для не почти слойно конечных подгрупп // Укр. мат. журн. Т. 43(7–8). 1991. С. 1002–1008.
6. Сенашов В. И. Достаточные условия почти слойной конечности группы // Укр. мат. журн. Т. 51(4). 1999. С. 472–485.
7. Сенашов В. И., Шунков В. П. Почти слойная конечность периодической части группы без инволюций // Дискретная математика. Т. 15(3). 2003. С. 91–104.
8. Сенашов В. И. О группах Шункова с сильно вложенной подгруппой // Труды ИММ УрО РАН. Т. 15(2). 2009. С. 203–210.
9. Сенашов В. И. О группах Шункова с сильно вложенной почти слойно конечной подгруппой // Труды ИММ УрО РАН. Т. 16(3). 2010. С. 234–239.
10. Сенашов В. И. О группах с сильно вложенной подгруппой, обладающей почти слойно конечной периодической частью // Укр. мат. журнал. Т. 64(3). 2012. С. 384–391.
11. Шунков В. П. О периодических группах с почти регулярной инволюцией // Алгебра и логика. Т. 11(4). 1972. С. 470–493.
12. Черников С. Н. Группы с заданными свойствами системы подгрупп. М.: Наука, 1980.
13. Шунков В. П. T_0 -группы. Новосибирск: Наука, 2000.
14. Сенашов В. И. О некоторых подгруппах в группах Шункова и о почти слойно конечных группах // Алгебра и ее приложения: тр. Междунар. алгебраич. конф. Нальчик. 2010. С. 149–153.
15. Шунков В. П. О локально конечных группах конечного ранга // Алгебра и логика, Т. 10(2). 1971. С. 199–225.
16. Шунков В. П. О проблеме минимальности для локально конечных групп // Алгебра и логика. Т. 9(2). 1970. С. 220–248.
17. Курош А. Г. Теория групп. 3-е изд. М.: Наука, 1967.
18. Каргаполов М. И., Мерзляков Ю. И. Основы теории групп. 3-е изд. М.: Наука, 1982.

© Сенашов В. И., 2013

УДК 539.374

ЛИНИИ ТОКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАНДТЛЯ

С. И. Сенашов, Е. В. Филюшина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sen@sibsau.ru, filyushina@sibsau.ru

Рассмотрены уравнения пластичности в стационарном двумерном случае. Для решения Прандтля описывающее сжатие пластического слоя жесткими плитами рассмотрено два поля скоростей. Одно из них решение Надаи, второе новое решение. Показано что линии тока у этих решений совпадают. Исходя из принципа максимума диссипации, указаны области использования этих полей скоростей.

Ключевые слова: пластичность, линии тока, поле скоростей, новые решения.

CURRENT LINES FOR PRANDTL SOLUTION

S. I. Senashov, E. V. Filyushina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarsky Rabochy” prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sen@sibsau.ru, filyushina@sibsau.ru

The authors consider plasticity equations in a stationary two-dimensional case. For Prandtl solution, which describes the compression of plastic layer by rigid plates, the authors consider two velocity fields. The first one is Nadai

solution, the second one is the new solution. The authors prove that the current lines in these solutions coincide. Based on the principle of maximum dissipation, the spheres of usage of these velocity fields are defined.

Keywords: plasticity, streamline, velocity field, new solutions.

Рассмотрим уравнение идеальной пластичности в форме Сен-Венана-Леви. Они имеют вид

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} - 2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \cos 2\theta + \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin 2\theta \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} - 2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \sin 2\theta - \frac{\partial \theta}{\partial y} \cos 2\theta \right) = 0,$$

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \operatorname{tg} 2\theta + \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0,$$

где σ – гидростатическое давление; θ – угол между первым главным направлением тензора напряжений и осью OX ; v_x, v_y – компоненты вектора скорости, постоянная пластичности для простоты положена равной единице.

Уравнения (1), (2) описывают напряженно-деформированное состояние пластической среды.

Система уравнений (1)–(2) уже достаточно подробно изучена. Для нее известны группы симметрий, законы сохранения, точные решения. Обзор этих и других результатов можно найти в [1; 2].

Наиболее известное решение уравнений (1) – это решение Прандтля, которое можно использовать для описания напряженного состояния пластического слоя, сжимаемого жесткими плитами:

$$\sigma = -x - \sqrt{1 - y^2}, \quad y = \cos 2\theta. \quad (3)$$

Подставляя (3) в систему (2) получаем систему линейных уравнений для определения полей скоростей совместных с этим решением.

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \frac{\sqrt{1 - y^2}}{y} + 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0.$$

Наиболее известное решение системы (4) – решение Надаи, которое имеет вид

$$v_x = x + 2\sqrt{1 - y^2}, \quad v_y = -y. \quad (5)$$

В [3; 4] приведены другие решения системы (4).

Там же показано, что решение (5) не дает максимум диссипации энергии во всей области $|y| \leq 1$.

Поэтому для описания деформируемого состояния следует использовать и другие поля скоростей. Приведем наиболее простое новое решение системы (4)

$$v_x = \left(\sqrt{\frac{1+y}{2}} - \sqrt{\frac{1-y}{2}} \right) \exp \left(\frac{-x - \sqrt{1-y^2}}{2} \right), \quad (6)$$

$$v_y = \left(\sqrt{\frac{1+y}{2}} + \sqrt{\frac{1-y}{2}} \right) \exp \left(\frac{-x - \sqrt{1-y^2}}{2} \right).$$

Для более полного анализа напряженно-деформированного состояния, кроме формул (4)–(6), необходимо использовать линии скольжения и линии тока. В данном случае нельзя использовать траектории движения точек среды, поскольку время явно не входит в уравнения (1)–(2). Использование временно-подобных параметров [5], по нашему мнению, спорно.

Линии скольжения для решения Прандтля известны и являются частями циклоид (рис. 1).

Для построения линий тока следует решить систему уравнений

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y}.$$

Для решения Надаи эта система сводится к квадратуре

$$d(xy) = \sqrt{1 - y^2} dy,$$

поэтому линии тока имеют вид

$$x = \int (\sqrt{1 - y^2}) / y dy = -\sqrt{1 - y^2} - \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 - y^2}}{y^2} \right) + C. \quad (7)$$

Эти линии тока приведены на рис. 2.

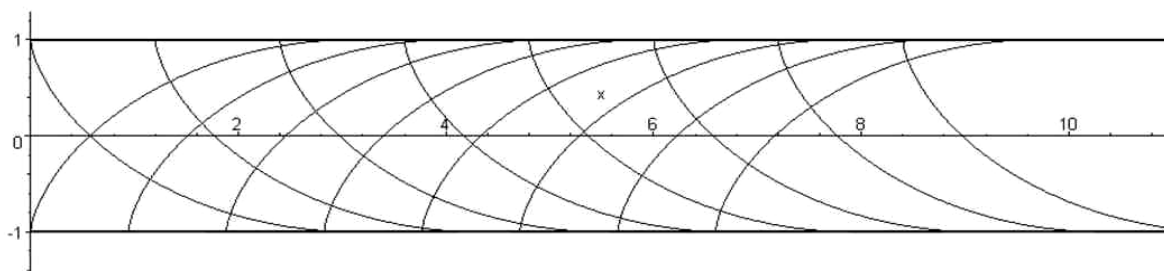


Рис. 1. Линии скольжения для решения Прандтля

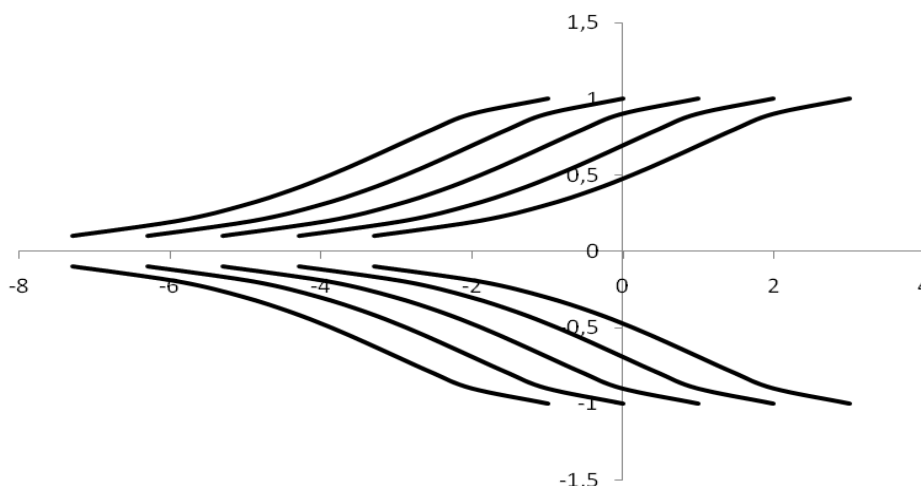


Рис. 2. Линии скольжения для решения Надаи

Найдем линии тока для поля скоростей (6). После несложных преобразований получаем

$$\frac{dx}{\sqrt{1+y}-\sqrt{1-y}} = \frac{dy}{\sqrt{1+y}+\sqrt{1-y}}.$$

Вычисляя квадратуры, получаем поле линий тока, совпадающее с (7).

Для дальнейшего анализа построенных решений вычислим диссипацию энергии для полей скоростей (5) и (6) и сравним полученные результаты. Известно, что согласно модифицированному принципу максимума Мизеса [6], на действительном поле скоростей диссипация должна быть максимальна:

$$\sigma_{ij}e_{ij} \geq \sigma_{ij}^*e_{ij}^*,$$

где величины без звездочек – действительные компоненты тензора напряжений и тензора скоростей деформации, а со звездочкой – возможные.

Вычислим диссипацию:

$$\begin{aligned} D &= \sigma_x e_x + \sigma_y e_y + 2\tau e_{xy} = \\ &= \frac{e_x^2 + e_y^2 + 2e_{xy}^2}{\sqrt{e_x^2 + e_y^2 + 2e_{xy}^2}} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + 2e_{xy}^2}. \end{aligned}$$

Поскольку $e_x^2 = e_y^2$, $2e_{xy} = e_x \frac{y}{\sqrt{1-y^2}} = H(y)e_x$, то

$$D = |e_x| \sqrt{2 + H^2(y)}.$$

Для решения Надаи диссипация равна

$$D_1 = \sqrt{2 + H^2(y)}.$$

Для решения (6) аналогично получаем

$$D_2 = \frac{1}{2} \left| \sqrt{\frac{1+y}{2}} - \sqrt{\frac{1-y}{2}} \right| D_1 \exp \left(\frac{-x - \sqrt{1-y^2}}{2} \right).$$

Из сравнения D_1 и D_2 следует, что при $x > 0$ есть области, где предпочтительнее поле скоростей Надаи, а при $x < 0$ есть области, где предпочтительнее поле скоростей (6).

Из полученных результатов следует, что известное поле скоростей Надаи не всегда является предпочтительным перед другими полями скоростей. А поскольку система уравнений (4) имеет бесконечно много решений, то задачу по построению полей скоростей, соответствующих решению Прандтля, нельзя считать окончательно решенной.

Библиографические ссылки

1. Сенашов С. И., Гомонова О. В., Яхно А. Н. Математические вопросы двумерных уравнений пластичности : монография. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012.
2. Сенашов С. И., Филлюшина Е. В. Преобразование точных решений уравнений пластичности высшими симметриями // Вестник СибГАУ. 2011. № 4 (37). С. 90–92.
3. Сенашов С. И., Гомонова О. В. Новые поля скоростей, описывающие сжатие слоя между плитами // Вестник ЧГПУ. Сер. Механика предельного состояния. 2012. №4. С. 89–95.
4. Сенашов С. И., Гомонова О. В. О построении полей скоростей для известных неособых полей напряжений // Вестник СибГАУ. 2011. № 5 (38). С. 88–90.
5. Соколовский В. В. Теория пластичности // М. : Высш. школа, 1969.
6. Предельное состояние деформированных тел и горных пород / Д. Д. Ивлев [и др.]. М. : Физматлит, 2008.

© Сенашов С. И., Филлюшина Е. В., 2013

УДК 629.78.054

ДИНАМИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КА

Д. Е. Синицкий¹, А. В. Мурыгин²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: dimasik77@yandex.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: avm514@mail.ru

Рассматривается принцип измерения управляющего момента двигателя-маховика на динамическом стенде измерения момента. Проведена оценка результатов функционирования стенда.

Ключевые слова: система ориентации и стабилизации, космический аппарат, двигатель-маховик, стенд, силовая компенсация.

DYNAMICAL WORKBENCH FOR SIGNATURE ANALYSIS AND OPERATING CONDITIONS OF FLYWHEEL ENGINE GROUP OF POINTING AND ATTITUDE CONTROL SYSTEMS OF SPACECRAFTS

D. E. Synitskiy¹, A. V. Murygin²

¹JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev
52, Lenin street, Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: dimasik77@yandex.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: avm514@mail.ru

The authors consider a measurement principle of measurement of dynamic moment of flywheel-engine group at a dynamic workbench for measurement of the moment and evaluate the results of the workbench operation data.

Keywords: attitude control system, spacecraft, flywheel-engine group, workbench, dynamical compensation.

Система ориентации и стабилизации (СОС) современных КА является сложной системой, состоящей из высокоточных приборов определения углового положения, измерения угловых скоростей КА и исполнительных органов. В качестве исполнительного органа систем ориентации и стабилизации, для создания динамических управляющих моментов по трем осям связанной с КА системой координат используются двигатели-маховики. Двигатели-маховики выполнены на основе управляемого моментного бесконтактного двигателя постоянного тока. Функции маховой массы выполняет ротор с постоянными магнитами, расположенными на максимально возможном диаметре, в двигателях-маховиках максимально снижены тормозные моменты. Электродвигатель обеспечивает реверсивное вращение ротора-маховика, его торможение, а величина создаваемого им вращающего (управляющего) момента при этом может плавно меняться в заданном диапазоне в соответствии с сигналом управления, подаваемым на вход двигателя-маховика.

При наземных лабораторных испытаниях современных СОС КА необходимо с высокой точностью производить измерения управляющего момента двигателя-маховика и контролировать его параметры.

На сегодняшний день для измерения динамического момента двигателя-маховика существует динамический стенд ИМ-15, разработанный в НПП «Полус»

[1]. Использовался на предприятиях аэрокосмического комплекса СССР.

Способ непосредственного измерения управляющего момента с использованием данных, полученных из блока электроники маховика, и разработанный в ОАО «ИСС», применяется в настоящее время в ОАО «ИСС» для исследования характеристик и режимов работы управляющих двигателей-маховиков.

При выборе метода измерения управляющего момента необходимо учесть следующие факторы:

- непрерывные испытания СОС КА проводятся в течение 8 часов;

- при испытании СОС одновременно могут работать три маховика, поэтому необходимо измерять моменты нескольких маховиков одновременно.

Принцип работы стенда измерения момента представлен на рис. 1.

Динамический момент, генерируемый УДМ 5, складывается через приспособление 4 к основанию 2. Основание, опираясь на три разнесенных друг от друга на определенные расстояния датчика 3, вызывает деформацию чувствительного элемента каждого из датчиков. Датчики преобразуют деформацию в электрические сигналы, эквивалентные создаваемым усилиям, и передают их в блок обработки информации (БОИ). БОИ преобразует эти сигналы и производит операцию вычисления динамического момента, генерируемого ЭМИО.

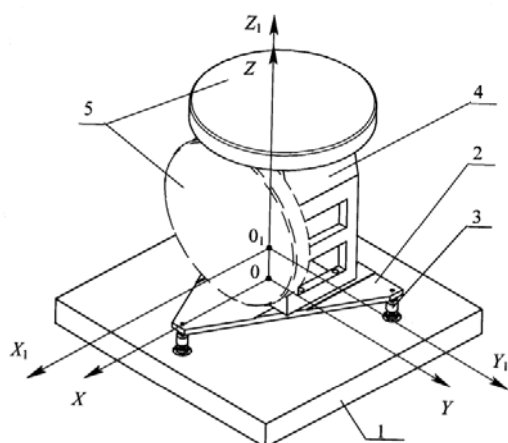


Рис. 1. Общий вид стенда ИМ-15:

1 – платформа для установки стенда; 2 – основание стенда; 3 – датчики деформации; 4 – приспособление для крепления управляющего двигателя-маховика; 5 – управляющий двигатель-маховик (УДМ)

В качестве чувствительного элемента стенда применяются датчики силы, работающие на основе пьезоэффекта. При измерении момента необходимо менять положение маховика, переставляя его из вертикального положения в горизонтальное.

При испытаниях СОС необходимо иметь возможность непрерывного измерения управляющего момента как одного двигателя-маховика, так и нескольких двигателей-маховиков одновременно, что не позволяет осуществить ИМ-15 разработанного НПЦ «Полус».

До настоящего времени в ОАО «ИСС» динамический момент измерялся напрямую через блок электроники УДМ. С помощью ПО СОС и математического комплекса искомое значение момента выделяется из массива данных, поступающего из блока электроники, преобразуется и выводится на экран монитора.

Недостатки данного способа измерения момента:

- цена младшего разряда передаваемого массива данных может принимать высокое значение, что приведет к грубому определению момента;

- информация для определения момента берется из блока электроники, а не напрямую от маховика, проходит по каналу обмена через компьютер и математический комплекс, где так же возможны искажения информации и ошибки вычисления, что приведет к грубому или неточному определению момента.

Для разработки нового динамического стенда измерения управляющего момента, создаваемого двигателем-маховиком, используем метод силовой компенсации, заключающийся в создании противодействующего момента, равного неизвестному, измеряемому моменту.

Обобщенная блок-схема метода силовой компенсации [2] представлена на рис. 2.

Под действием момента M объект поворачивается вокруг оси подвеса, что фиксируется ДУ. Сигнал с ДУ поступает в БУ, где он преобразуется и корректируется и поступает на ДМ. ДМ развивает момент M_{OC} , который приложен к объекту и препятствует его пово-

роту. Когда объект повернется на некоторый угол φ датчик момента скомпенсирует момент M и момент остановится. Мерой момента является угол поворота.

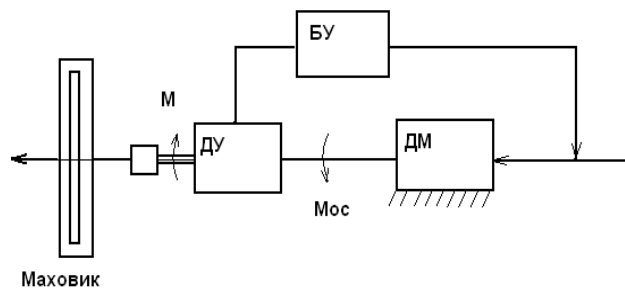


Рис. 2. Обобщенная блок-схема измерителя момента:

ДУ – датчик угла поворота маховика; ДМ – датчик момента; БУ – блок управления; M – управляющий момент, развиваемый маховиком; M_{OC} – момент датчика момента

Уравнение движения системы силовой компенсации имеет вид

$$\ddot{\varphi} = \frac{\Delta M}{Y_0}; \quad \Delta M = M - M_{OC}; \quad M_{OC} = \kappa_1 \cdot \varphi + \kappa_2 \cdot \dot{\varphi}, \quad (1)$$

где Y_0 – момент инерции стенда; κ_1 – коэффициент демпфирования (сопротивления) системы; κ_2 – коэффициент угловой жесткости системы; M – управляющий момент, создаваемый маховиком; M_{OC} – момент обратной связи, развиваемый датчиком момента.

Преобразуем (1) к виду

$$Y_0 \cdot \ddot{\varphi} + \kappa_1 \cdot \dot{\varphi} + (\kappa_2) \cdot \varphi = M \cdot \sin \omega t. \quad (2)$$

Используя особенности датчиков момента, а также определенные характеристики БУ, можно получить зависимость тока, протекающего в датчике момента от угла поворота φ , фиксируемого ДУ. Зная данную зависимость, можно определить искомый момент. Кроме того, используя метод силовой компенсации совместно со специализированной ЭВМ, можно измерить момент одновременно с четырех маховиков либо с отдельных маховиков, применяя к каждому из маховиков метод силовой компенсации.

Метод силовой компенсации позволяет непрерывно измерять момент, создаваемый маховиком. Также данный метод позволяет одновременно измерять момент, создаваемый четырьмя маховиками. При этом управляющий момент будет измеряться непосредственно от двигателя-маховика, а не из блока электроники. Используем метод силовой компенсации для разработки стенда измерения момента.

В ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» разработан стенд измерения динамического момента двигателя-маховика.

Обобщенная блок-схема динамического стенда измерения момента (ДСИМ) представлена на рис. 3.

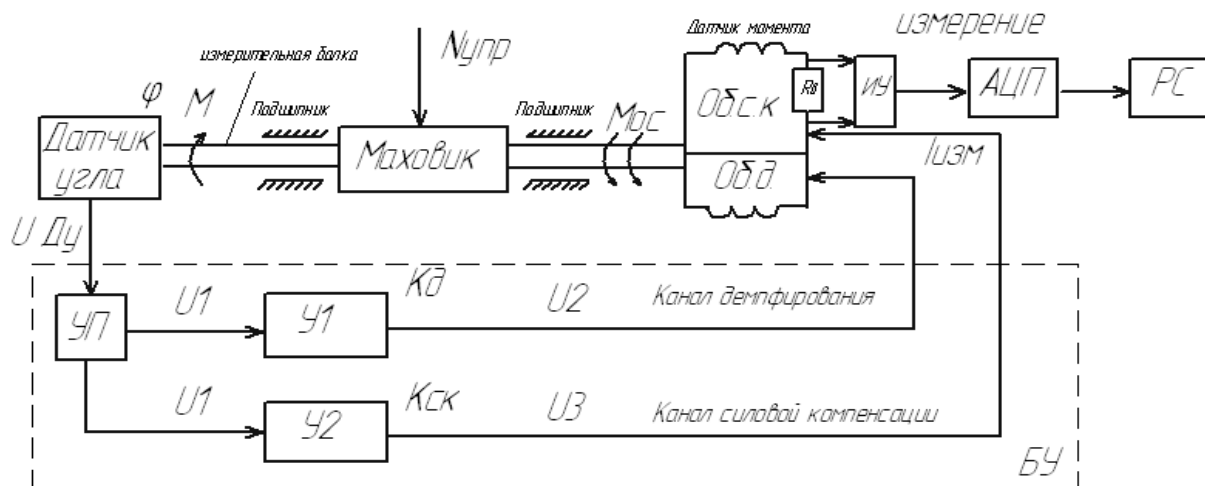


Рис. 3. Обобщенная блок-схема ДСИМ:

$N_{упр}$ – код управления; M – управляющий момент, создаваемый двигателем-маховиком; φ – угол поворота измерительной балки; $U_{ДУ}$ – сигнал, создаваемый датчиком угла; БУ – блок управления; УП – предварительный усилитель; У1, У2 – усилители; Об.с.к. – обмотка силовой компенсации датчика момента; Об.д. – обмотка демпфирования датчика момента; $M_{ос}$ – момент обратной связи; ИУ – измерительное устройство

При подаче управляющего кода $N_{упр}$ маховик создает управляющий момент M , приводящий к повороту измерительной балки в подшипниковых опорах на угол φ , что фиксируется датчиком угла. Сигнал $U_{ДУ}$ с датчика угла поступает в блок управления (БУ), где преобразуется и корректируется, а затем поступает на магнитоэлектрический датчик момента. БУ разбивает сигнал от ДУ на два сигнала. Первый служит для формирования канала демпфирования, второй – для формирования канала силовой компенсации. Оба сигнала поступают в датчик момента, который, исходя из полученной информации, создает момент обратной связи $M_{ос}$, который прикладывается к измерительной балке, тем самым компенсируя момент, создаваемый маховиком. При этом в обмотке силовой компенсации датчика момента будет протекать ток. Искомое значение тока замеряется с помощью измерительного устройства. Затем сигнал поступает в АЦП, где преобразуется и выводится на вычислительную ЭВМ (РС).

Блок управления обеспечивает требуемые для измерения управляющего момента коэффициенты угловой жесткости и демпфирования путем усиления, преобразования, коррекции сигналов датчика угла опоры до уровня и мощности, необходимых для работы датчика момента и измерения тока в его обмотке.

На рис. 4 пунктирной линией выделены части, входящие в блок управления. Вход блока управления соединен с выходом предварительного усилителя (УП), размещенного в непосредственной близости к датчику угла. Выходы БУ соединяются с датчиком момента, обмотка которого разделена на две части – обмотку силовой компенсации и демпфирующую обмотку. Разделение обмотки позволяет исключить искажения, вносимые корректирующими цепями, при измерении момента в динамических режимах. Блок

управления также имеет выходы для индикации и регистрации измеряемого момента, о величине которого судят по напряжению, создаваемому током в обмотке силовой компенсации на добавочном сопротивлении.

Блок состоит из усилителя-преобразователя, усилителя 1, усилителя 2, измерительного усилителя.

УП – усилитель-преобразователь – размещен в непосредственной близости к датчику угла и предназначен для усиления сигнала датчика угла (ДУ). Включает в себя усилитель переменного тока и демодулятор, так как датчик переменного тока, а корректирующие цепи и ДМ работают на постоянном токе. Также УП должен обеспечивать одновременную регулировку в обоих каналах и иметь возможность регулировки коэффициента передачи $K_{П}$:

$$U_1 = K_{П} \cdot U_{ДУ}.$$

Усилитель 1 (У1) предназначен для усиления сигнала $U1$ канала демпфирования, а также частотной коррекции системы силовой компенсации. Усилитель должен иметь защиту от перепада напряжения. Необходимо иметь возможность регулировки коэффициента передачи $K_{Д}$:

$$I_1 = K_{Д} \cdot \frac{U1}{R_{Д}},$$

где $R_{Д}$ – сопротивление обмотки демпфирования.

Усилитель 2 (У2) предназначен для усиления сигнала $U1$ канала силовой компенсации. Усилитель должен иметь защиту от перепада напряжения. Необходимо иметь возможность регулировки коэффициента передачи $K_{СК}$:

$$I_{изм} = K_{СК} \cdot \frac{U1}{R_{С}},$$

где $R_{С}$ – сопротивление обмотки силовой компенсации.

ИУ – измерительный усилитель – предназначен для измерения тока, протекающего в цепи обмотки силовой компенсации, путем измерения падения напряжения на добавочном сопротивлении.

Для преобразования значения тока в обмотке силовой компенсации датчика момента в значение искомого момента используем схему преобразования (рис. 4).

В испытаниях СОС КА, используются четыре УДМ, поэтому необходимо обеспечить возможность измерения M_d четырех УДМ одновременно, а также измерения момента отдельных УДМ. Для чего необходимо установить четыре ДСИМ (СИМ1, СИМ2, СИМ3, СИМ4) на каждый УДМ.

Для определения искомого значения M_d по значению $I_{изм}$ используется АЦП для преобразования аналогового сигнала $I_{изм 1}$, $I_{изм 2}$, $I_{изм 3}$, $I_{изм 4}$, измеренного с помощью измерительного усилителя, в цифровое значение $I_{преобр 1}$, $I_{преобр 2}$, $I_{преобр 3}$, $I_{преобр 4}$.

Для преобр 4, необходимое для вычисления M_d с помощью специализированного ЭВМ (РС).

Для оценки эффективности метода силовой компенсации проведены расчеты основных параметров и коэффициентов ДСИМ, произведен выбор элементов системы. Проведено моделирование функционирования стенда в разомкнутом контуре управления для измерения управляющих моментов современных двигателей-маховиков. Для этого в среде Matlab построены переходные процессы для УДМ и ДСИМ при различных входных воздействиях, по которым определена ошибка измерения момента. Структурная схема моделирования в разомкнутом контуре представлена на рис. 5. Результаты моделирования при ступенчатом входном воздействии приведены на рис. 6.

При ступенчатом воздействии переходные процессы имеют вид (рис. 6).

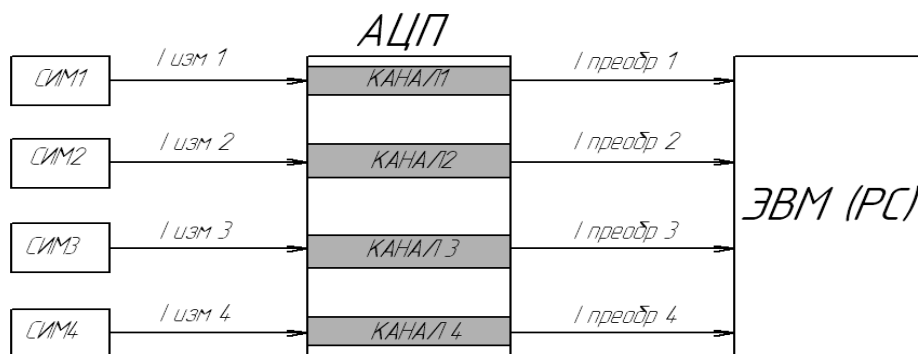


Рис. 4. Структурная схема преобразования выходного сигнала УДМ в искомое значение момента:
СИМ1, СИМ2, СИМ3, СИМ4 – стенды измерения динамического момента, маховиков УДМ1, УДМ2, УДМ3, УДМ4; $I_{изм 1}$, $I_{изм 2}$, $I_{изм 3}$, $I_{изм 4}$ – токи, измеренные на добавочных сопротивлениях СИМ1, СИМ2, СИМ3, СИМ4; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; $I_{преобр 1}$, $I_{преобр 2}$, $I_{преобр 3}$, $I_{преобр 4}$ – цифровое значение токов $I_{изм 1}$, $I_{изм 2}$, $I_{изм 3}$, $I_{изм 4}$

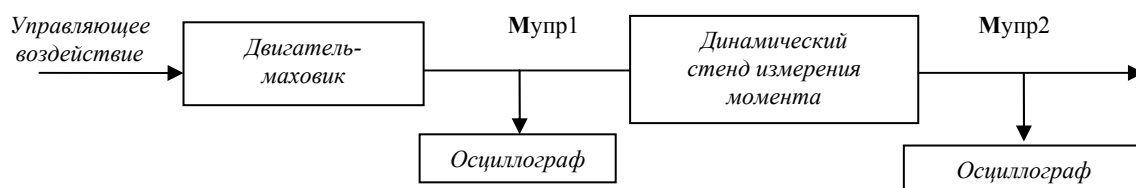


Рис. 5. Структурная схема моделирования в разомкнутом контуре

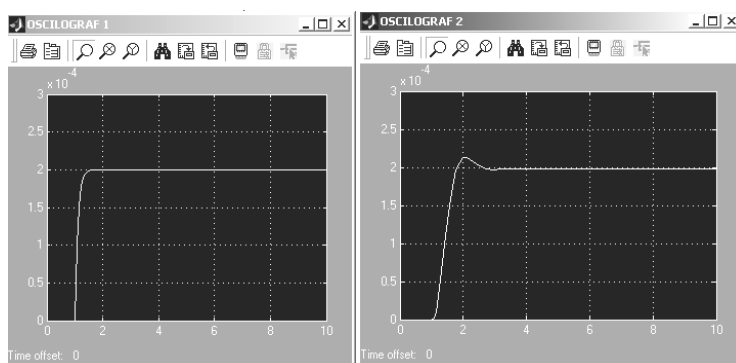


Рис. 6. Переходные процессы при ступенчатом входном воздействии

Сравним показания осциллографов 1 и 2, определим ошибку измерения момента, которая не превышает 1 %.

Таким образом, в результате исследования разработан стенд, способный производить непрерывное измерение управляющих моментов с четырех двигателей-маховиков, позволяющий исследовать основные характеристики и режимы работы УДМ. При этом данные о величине измеряемого момента измеряются непосредственно с двигателя-маховика, тем самым повышается точность измерений, исключаются ошибки вычисления, задержки. Динамический стенд измерения момента (ДСИМ) соответствует приведенным требованиям и наиболее подходит для измерения

управляющих моментов двигателей-маховиков в замкнутом контуре полунатурного моделирования при испытаниях СОС КА.

Библиографические ссылки

1. Кузина М. В., Сабинин И. С. Измеритель моментов ИМ-15 / НПЦ «Полус». Томск, 2006.
2. Комплекс динамического моделирования систем управления подвижных объектов / А. В. Калганов, Н. В. Камашев, В. Я. Скорых, А. Н. Гормаков. Томск, 1983.

© Сеницкий Д. Е., Мурыгин А. В., 2013

УДК 681.34

МОДЕЛЬ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ*

Р. Ю. Царев¹, А. Н. Пупков², М. А. Огнерубова¹, М. В. Сержантова¹, Н. А. Бесчастная¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: rahatamatahata@mail.ru

²Сибирский федеральный университет
660074, Красноярск, ул. Киренского, 26а. E-mail: alex007p@yandex.ru

Рассматривается модель анализа надежности распределенных вычислительных систем с архитектурой клиент-сервер. Предложенная модель позволяет получить соотношения для показателей надежности распределенной вычислительной системы без каких-либо предположений о законах распределения случайных величин и числе элементов системы.

Ключевые слова: распределенные вычислительные системы, клиент-сервер, архитектура, надежность.

MODEL OF ANALYSIS OF DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS RELIABILITY

R. Yu. Tsarev¹, A. N. Pupkov², M. A. Ognerubova¹, M. V. Serzhantova¹, N. A. Beschastnaya¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarsky Rabochy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: rahatamatahata@mail.ru
²Siberian Federal University

26a Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: alex007p@yandex.ru

The paper presents a model of reliability analysis of distributed computing systems with client-server architecture. The proposed model allows to obtain correlation between reliability parameters of distributed computing system without any assumptions about the random variables distribution laws and the number of system elements.

Keywords: distributed computing systems, client-server, architecture, reliability.

Характерной особенностью многих клиент-серверных приложений (КС-приложений) современных распределенных вычислительных систем является их разнородность и рассредоточенность. При проектировании распределенных вычислительных систем имеется ряд специфических особенностей. Это, в первую очередь, зависимость архитектурной модели от ряда

нефункциональных системных требований, например, производительности, защищенности, безопасности, надежности [1]. При анализе архитектурных решений в рамках современных систем существенное значение для разработчика имеет возможность оценки архитектурной надежности КС-приложений как важной составной части системы [2].

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1872 «Синтез оптимальных катастрофоустойчивых распределенных вычислительных систем».

В распределенной вычислительной системе, кроме того, разные системные компоненты могут быть реализованы на разных языках программирования и выполняться на разных типах процессоров. Модели данных, представление информации и протоколы взаимодействия не являются однотипными в распределенных системах, поэтому архитектурная надежность является немаловажным фактором при проектировании [3]. Как правило, промежуточные составляющие формируются из готовых компонентов и не требуют от разработчиков специальных доработок.

В архитектуре «клиент-сервер» серверная часть, как правило, устанавливается на отдельном компьютере-сервере, а клиентские части программного обеспечения (ПО) на рабочих местах, причем функциональный состав ПО – на рабочих местах различен. Серверная и клиентские части ПО могут функционировать в различных операционных средах. В связи с этим важной и актуальной является проблема анализа надежностных характеристик распределенных вычислительных систем с клиент-серверной архитектурой.

Математическая модель анализа распределенных вычислительных систем клиент-серверной архитектуры. Предполагаем, что рассматриваемая система функционирует в нормальных (не граничных) условиях, поэтому можно допустить независимость отдельных отказов. В предлагаемой модели подсистемы невосстанавливаемы.

Под распределенной вычислительной системой (РВС) будем понимать совокупность аппаратных и программных средств, реализующих следующие основные функции [4]: обработку, хранение, передачу и защиту данных. Структура вычислительной системы представлена на рис. 1, где сервер – это элемент, включающий в себя систему хранения данных (СХД) со своими системой передачи даны (СПД) и системой безопасности (СБ), клиент – элемент системы, содержащий систему обработки данных (СОД) со своими

СПД и СБ, а концентратор служит для связи клиентов и сервера и состоит из СПД и СБ [5]. Будем рассматривать систему с N клиентами и одним сервером.

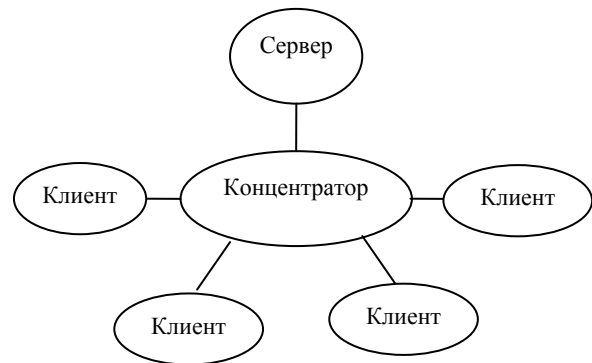


Рис. 1. Структура распределенной вычислительной системы с радиальной структурой

Можно выделить следующие виды отказов системы безопасности: скрытый и ложный [6]. При скрытом отказе СБ не парирует отказы остальных подсистем, при ложном СБ самопроизвольно вырабатывает защитные функции при нормальной работе СХД, СОД и СПД и приводит к останову системы.

Основным показателем надежности будем считать вероятность потери данных за определенный интервал времени. Под потерей данных будем понимать реальное уничтожение или утечку данных либо невозможность в течение достаточно длительного интервала времени получить доступ к ним.

Описание математической модели. На рис. 2 приведена графическая модель функционирования распределенной вычислительной системы, отражающая отказы ее подсистем и дальнейшее развитие ситуаций. Сплошными линиями обозначены переходы элементов, штриховыми – развитие ситуаций отказов элементов.

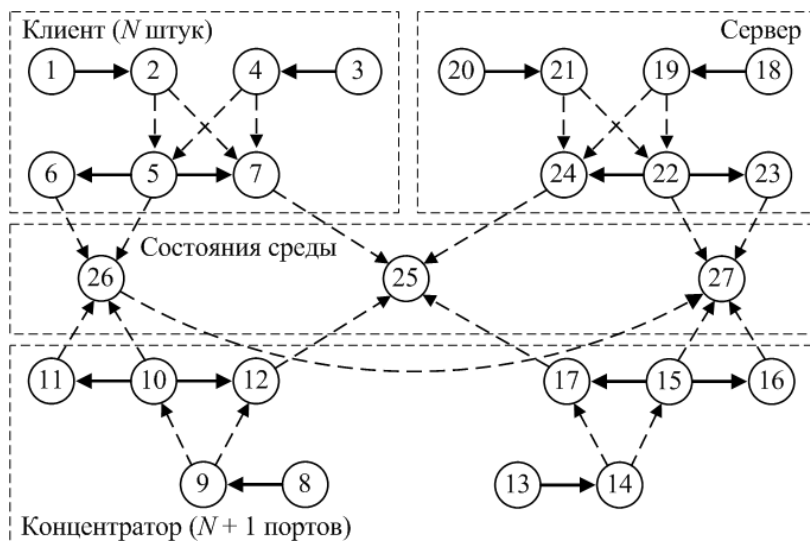


Рис. 2. Графическая модель функционирования распределенной вычислительной системы

Состояния в графе означают следующее: 1 – нормальная работа СОД; 2 – отказ СОД; 3 – нормальная работа СПД клиента; 4 – отказ СПД клиента; 5 – нормальная работа СБ клиента; 6 – ложный отказ СБ клиента; 7 – скрытый отказ СБ клиента; 8 – нормальная работа СПД порта концентратора, к которому подключен клиент; 9 – отказ СПД порта концентратора, к которому подключен клиент; 10 – нормальная работа порта СБ концентратора, к которому подключен клиент; 11 – ложный отказ СБ порта концентратора, к которому подключен клиент; 12 – скрытый отказ СБ порта концентратора, к которому подключен клиент; 13 – нормальная работа СПД порта концентратора, к которому подключен сервер; 14 – отказ СПД порта концентратора, к которому подключен сервер; 15 – нормальная работа порта СБ концентратора, к которому подключен сервер; 16 – ложный отказ СБ порта концентратора, к которому подключен сервер; 17 – скрытый отказ СБ порта концентратора, к которому подключен сервер; 18 – нормальная работа СХД; 19 – отказ СХД; 20 – нормальная работа СПД сервера; 21 – отказ СПД сервера; 22 – нормальная работа СБ сервера; 23 – ложный отказ СБ сервера; 24 – скрытый отказ СБ сервера; 25 – состояние аварии РВС; 26 – состояние сниженной эффективности РВС; 27 – состояние останова РВС.

При отказе СОД или СПД на клиенте либо отказе СПД порта концентратора, к которому подключен клиент, при нормально работающей соответствующей СБ клиент или порт концентратора переходит в состояние останова, а сама система – в состояние сниженной эффективности (как и при ложном отказе СБ клиента или порта концентратора, к которому подключен клиент). При отказе СХД или СПД сервера или СПД порта концентратора, к которому подключен сервер, при нормально работающей соответствующей СБ распределенная вычислительная система переходит в состояние останова, как и при ложном отказе СБ сервера или порта концентратора, к которому он подключен, а также при останове всех клиентов или портов концентратора, к которым подключены клиенты. При отказе любой из подсистем при скрытом отказе отвечающей за ее контроль СБ система переходит в состояние аварии.

Будем рассматривать поведение системы на интервале $[0, t]$. Введем необходимые обозначения. Пусть ψ – наработка до отказа СОД, имеющая распределение $f_\psi(t) = P(\psi \leq t)$; δ – наработка до отказа СХД, имеющая распределение $F_\delta(t) = P(\delta \leq t)$; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – наработки до отказа клиента порта концентратора и сервера соответственно, имеющие распределения $F_{\gamma_1}(t) = P(\gamma_1 \leq t)$, $F_{\gamma_2}(t) = P(\gamma_2 \leq t)$, $F_{\gamma_3}(t) = P(\gamma_3 \leq t)$.

Обозначим через ρ_1, ρ_2 , и ρ_3 наработки до скрытых, а через η_1, η_2 и η_3 наработки до ложных отказов СБ клиента, порта концентратора и сервера соответственно с распределениями

$$F_{\rho_1}(t) = P(\rho_1 \leq t), F_{\rho_2}(t) = P(\rho_2 \leq t),$$

$$F_{\rho_3}(t) = P(\rho_3 \leq t), F_{\eta_1}(t) = P(\eta_1 \leq t),$$

$$F_{\eta_2}(t) = P(\eta_2 \leq t), F_{\eta_3}(t) = P(\eta_3 \leq t).$$

Показатели надежности. Под показателями надежности подразумеваются вероятности перехода системы в состояния останова и аварии, а также интенсивности этих переходов [7; 8]. Вначале рассмотрим показатели надежности, относящиеся к переходам в состояние останова.

Останов распределенной вычислительной системы наступит, если в состояние останова перейдут все клиенты или все порты концентратора, к которым подключены клиенты, сервер или порт концентратора, к которому он подключен.

Вероятность того, что на интервале $[0, t]$ произойдет останов, можно записать следующим образом:

$$P_o(t) = 1 - M(\bar{P}_{ок1}(t)\bar{P}_{ок2}(t)\bar{P}_{ок3}(t)\bar{P}_{ок}(t)),$$

где $P_{ок1}(t)$ – вероятность останова всех клиентов к моменту времени t ; $P_{ок2}(t)$ – вероятность останова всех портов концентратора, к которым подключены клиенты, к моменту времени t ; $P_{ок3}(t)$ – вероятность останова порта концентратора, к которому подключен сервер, к моменту времени t ; $P_{ок}(t)$ – вероятность останова сервера к моменту времени t .

Введем вспомогательные переменные. Пусть ζ_i – время до останова i -го клиента, где $i = \overline{1, N}$. Тогда вероятность того, что на интервале $[0, t]$ произойдет останов верх клиентов, определяется выражением

$$P_{ок1}(t) = P\left(\bigvee_{i=1}^N \zeta_i \leq t\right),$$

$$\bigvee_{i=1}^N \zeta_i = \max(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_N)$$

Используя свойства индикаторов и математического ожидания, получим

$$\begin{aligned} P_{ок1}(t) &= M I_{\bigvee_{i=1}^N \zeta_i \leq t} = M \prod_{i=1}^N I_{\zeta_i \leq t} = \\ &= \prod_{i=1}^N M I_{\zeta_i \leq t} = \prod_{i=1}^N P(\zeta_i \leq t) = \prod_{i=1}^N (1 - \bar{P}_{ок}(t)), \end{aligned}$$

где $P_{ок}(t)$ – вероятность того, что останов i -го клиента не произойдет к моменту времени t ; $I_{\zeta_i \leq t}$ – функция-индикатор ($I_{\zeta_i \leq t} = 1$ при $\zeta_i \leq t$ и $I_{\zeta_i \leq t} = 0$ при $\zeta_i > t$).

Вероятность того, что i -й клиент к моменту времени t не перейдет в состояние останова:

$$\bar{P}_{ок}(t) = P(I_{\rho_{li} \geq \psi_i \wedge \gamma_{li}} \psi_i \wedge \gamma_{li} \wedge \eta_{li} + I_{\rho_{li} < \psi_i \wedge \gamma_{li}} \eta_{li} > t),$$

где $\psi_i \wedge \gamma_{li} = \min(\psi_i, \gamma_{li})$.

Проведя ряд аналитических преобразований, получим

$$\begin{aligned} \bar{P}_{ок}(t) &= \bar{F}_{\eta_{li}}(t)((1 - F_{\rho_{li}}(\psi_i)F_{\rho_{li}}(\gamma_{li})) \times \\ &\times \bar{F}_{\psi_i}(t)\bar{F}_{\gamma_{li}}(t) + F_{\rho_{li}}(\psi_i)F_{\rho_{li}}(\gamma_{li})). \end{aligned} \quad (1)$$

Пусть τ_j – время до отказа j -го порта концентратора, к которому подключен клиент, где $j = \overline{1, N}$. Вероятность того, что на интервале $[0, t]$ произойдет останов всех портов концентратора, к которым подключены клиенты, определяется выражением

$$P_{ок2}(t) = P\left(\bigvee_{j=1}^N \tau_j \leq t\right) = MI_{\bigvee_{j=1}^N \tau_j \leq t}^N =$$

$$= M \prod_{j=1}^N I_{\tau_j \leq t} = \prod_{j=1}^N MI_{\tau_j \leq t} =$$

$$= \prod_{j=1}^N P(\tau_j \leq t) = \prod_{j=1}^N (1 - \bar{P}_{j\tau}(t)),$$

где $\bar{P}_{j\tau}(t)$ – вероятность того, что останову j -го порта концентратора не произойдет к моменту времени t . $\bar{P}_{j\tau}(t)$ можно записать следующим образом:

$$\bar{P}_{j\tau}(t) = P(I_{\rho_{2j} \geq \gamma_{2j}} \eta_{2j} \wedge \gamma_{2j} + I_{\rho_{2j} < \gamma_{2j}} \eta_{2j} > t) =$$

$$= \bar{F}_{\eta_{2j}}(t)(F_{\gamma_{2j}}(\rho_{2j})\bar{F}_{\gamma_{2j}}(t) + F_{\rho_{2j}}(\gamma_{2j})). \quad (2)$$

Аналогично можно записать вероятность того, что на интервале $[0, t]$ не произошел останов порта концентратора, к которому подключен сервер:

$$\bar{P}_{ок3}(t) = \bar{F}_{\eta_{2(N+1)}}(t)(F_{\gamma_{2(N+1)}}(\rho_{2(N+1)})\bar{F}_{\gamma_{2(N+1)}}(t) +$$

$$+ F_{\rho_{2(N+1)}}(\gamma_{2(N+1)})). \quad (3)$$

Вероятность того, что сервер не перешел в состояние останов на интервале $[0, t]$:

$$\bar{P}_{ос}(t) = P(I_{\rho_2 \geq \delta \wedge \gamma_3} \delta \wedge \gamma_3 \wedge \eta_3 + I_{\rho_2 < \delta \wedge \gamma_3} \eta_3 > t).$$

Прделав ряд преобразований, получим:

$$\bar{P}_{ос}(t) = \bar{F}_{\eta_3}(t)((1 - F_{\rho_3}(\delta)F_{\rho_3}(\gamma_3))\bar{F}_{\delta}(t)\bar{F}_{\gamma_3}(t) +$$

$$+ F_{\rho_3}(\delta)F_{\rho_3}(\gamma_3)). \quad (4)$$

Тогда вероятность того, что на интервале $[0, t]$ произойдет останов, можно записать следующим образом:

$$P_o(t) = 1 - M \left[\left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - \bar{P}_{iок}(t)) \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left(1 - \prod_{j=1}^N (1 - \bar{P}_{j\tau}(t)) \right) \bar{P}_{ок3}(t) \bar{P}_{ос}(t) \right].$$

Поскольку все отказы независимы, то это выражение можно записать так:

$$P_o(t) = 1 - \left[\left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - M\bar{P}_{iок}(t)) \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left(1 - \prod_{j=1}^N (1 - M\bar{P}_{j\tau}(t)) \right) M\bar{P}_{ок3}(t) M\bar{P}_{ос}(t) \right]. \quad (5)$$

Подставив (1), (2), (3) и (4) в (5), получим

$$P_o(t) = 1 -$$

$$- \left[1 - \prod_{j=1}^N (1 - \bar{F}_{\eta_{2j}}(t)(MF_{\gamma_{2j}}(\rho_{2j}) \times \bar{F}_{\gamma_{2j}}(t) + MF_{\rho_{2j}}(\gamma_{2j}))) \right] \times$$

$$\times \left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - \bar{F}_{\eta_{li}}(t) \times ((1 - MF_{\rho_{li}}(\psi_i)MF_{\rho_{li}}(\gamma_{li}))\bar{F}_{\psi_i}(t) + \right.$$

$$+ MF_{\rho_{li}}(\psi_i)MF_{\rho_{li}}(\gamma_{li})))$$

$$\times \bar{F}_{\eta_{2(N+1)}}(MF_{\gamma_{2(N+1)}}(\rho_{2(N+1)})\bar{F}_{\gamma_{2(N+1)}}(t) +$$

$$+ MF_{\rho_{2(N+1)}}(\gamma_{2(N+1)})\bar{F}_{\eta_3}(t) \times$$

$$\times ((1 - MF_{\rho_3}(\delta)MF_{\rho_3}(\gamma_3))\bar{F}_{\delta}(t)\bar{F}_{\gamma_3}(t) + MF_{\rho_3}(\delta)MF_{\rho_3}(\gamma_3))).$$

Теперь найдем зависимость интенсивности остановов от времени, которую обозначим $\sigma_o(t)$:

$$\sigma_o(t) = \frac{dP_o(t)/dt}{1 - P_o(t)}.$$

Таким образом, были получены выражения для вычисления вероятности останова и интенсивности остановов распределенной вычислительной системы на интервале времени $[0, t]$.

Теперь рассмотрим показатели надежности, относящиеся к переходам системы в состояние аварии. Авария произойдет, если в аварийное состояние перейдет хотя бы один клиент, порт концентратора или сервер [9]. Подсистема переходит в аварийное состояние, если после скрытого отказа СБ происходит отказ контролируемых ею подсистем.

Вероятность того, что на интервале $[0, t]$ произойдет авария, можно записать следующим образом:

$$P_{ак}(t) = 1 - M(\bar{P}_{ак1}(t)\bar{P}_{ак2}(t)\bar{P}_{ак}(t)),$$

где $P_{ак1}(t)$ – вероятность аварии одного из клиентов к моменту времени t ; $P_{ак2}(t)$ – вероятность аварии одного из портов концентратора к моменту времени t ; $P_{ак}(t)$ – вероятность аварии сервера к моменту времени t .

Введем вспомогательные переменные. Пусть ω_i – время до перехода i -го клиента в аварийное состояние, где $i \in \overline{1, N}$. Тогда вероятность того, что на интервале $[0, t]$ ни один клиент не перейдет в аварийное состояние, определяется выражением

$$\bar{P}_{ак1}(t) = P\left(\bigwedge_{i=1}^N \omega_i > t\right).$$

Выполнив ряд аналитических преобразований, получим

$$\bar{P}_{ак1}(t) = MI_{\bigwedge_{j=1}^N \omega_j > t}^N = M \prod_{i=1}^N I_{\omega_i > t} =$$

$$= \prod_{i=1}^N MI_{\omega_i > t} = \prod_{i=1}^N P(\omega_i > t) = \prod_{i=1}^N \bar{P}_{акi}(t),$$

где $\bar{P}_{акi}(t)$ – вероятность того, что авария i -го клиента не произойдет к моменту времени t .

Вероятность того, что i -й клиент на интервале $[0, t]$ не перейдет в состояние аварии:

$$\bar{P}_{акi}(t) = 1 - P(\rho_{li} \wedge t < \psi_i \wedge \gamma_{li} \leq t).$$

Отсюда

$$\bar{P}_{акi}(t) = 1 - I_{\rho_{li} \leq t}(P(\psi_i \wedge \gamma_{li} \leq t) - P(\omega_i \wedge \gamma_{li} \leq \rho_{li})).$$

Пусть ε_j – время до отказа j -го порта концентратора, ведущего к аварии РВС, где $j \in \overline{1, N+1}$. Тогда вероятность того, что ни один из портов концентратора не перейдет в аварийное состояние на интервале $[0, t]$, определяется выражением

$$\begin{aligned}\bar{P}_{a2}(t) &= P\left(\bigwedge_{j=1}^{N+1} \varepsilon_j > t\right) = MI_{N+1}^{\bigwedge_{j=1}^{N+1} \varepsilon_j > t} = \\ &= M \prod_{j=1}^{N+1} I_{\varepsilon_j > t} = \prod_{j=1}^{N+1} MI_{\varepsilon_j > t} = \\ &= \prod_{j=1}^{N+1} P(\varepsilon_j > t) = \prod_{j=1}^{N+1} \bar{P}_{je}(t),\end{aligned}$$

где $\bar{P}_{je}(t)$ – вероятность того, что j -й порт концентратора не перейдет в состояние аварии к моменту времени t .

$\bar{P}_{je}(t)$ можно записать следующим образом:

$$\bar{P}_{je}(t) = 1 - P(\rho_{2j} \wedge t < \gamma_{2j} \leq t).$$

Проведя ряд аналитических преобразований, получим:

$$\begin{aligned}\bar{P}_{je}(t) &= 1 - (P(\gamma_{2j} \leq t) - P(\gamma_{2j} \leq \rho_{2j} \wedge t)) = \\ &= 1 - I_{\rho_{2j} < t}(P(\gamma_{2j} \leq t) - P(\gamma_{2j} \leq \rho_{2j})).\end{aligned}$$

Вероятность того, что сервер не перешел в состояние аварии на интервале $[0, t]$:

$$\bar{P}_{ac}(t) = 1 - P(\rho_3 \wedge t < \delta \wedge \gamma_3 \leq t).$$

Преобразуем это выражение:

$$\begin{aligned}\bar{P}_{ac}(t) &= 1 - (P(\delta \wedge \gamma_3 \leq t) - P(\delta \wedge \gamma_3 \leq \rho_3 \wedge t)) = \\ &= 1 - I_{\rho_3 < t}(P(\delta \wedge \gamma_3 \leq t) - P(\delta \wedge \gamma_3 \leq \rho_3)).\end{aligned}$$

Тогда вероятность того, что на интервале $[0, t]$ произойдет авария, можно записать следующим образом:

$$P_a(t) = 1 - M\left(\left(\prod_{j=1}^{N+1} \bar{P}_{je}(t)\right)\left(\prod_{i=1}^{N+1} \bar{P}_{aki}(t)\right)\bar{P}_{ac}(t)\right).$$

В силу статистической независимости отказов запишем выражение так:

$$P_a(t) = 1 - \left(\prod_{j=1}^{N+1} M\bar{P}_{je}(t)\right) \times \left(\prod_{i=1}^N M\bar{P}_{aki}(t)\right) M\bar{P}_{ac}(t). \quad (6)$$

Опустив промежуточные преобразования, запишем конечные соотношения:

$$M\bar{P}_{aki}(t) = 1 - \left(MF_{\psi_i}(\gamma_{li}) \int_0^t F_{\rho_{li}}(y) dF_{\psi_i}(y) + MF_{\gamma_{li}}(\psi_i) \int_0^t F_{\rho_{li}}(y) dF_{\gamma_{li}}(y) \right); \quad (7)$$

$$M\bar{P}_{je}(t) = 1 - \int_0^t F_{\rho_{2j}}(y) dF_{\gamma_{2j}}(y); \quad (8)$$

$$M\bar{P}_{ac}(t) = 1 - \left(MF_{\delta}(\gamma_3) \int_0^t F_{\rho_3}(y) dF_{\delta}(y) + MF_{\gamma_3}(\delta) \int_0^t F_{\rho_3}(y) dF_{\gamma_3}(y) \right). \quad (9)$$

Подставив (7)–(9) в (6), получим

$$\begin{aligned}P_a(t) &= 1 - \left(\prod_{i=1}^N \left(1 - \left(MF_{\psi_i}(\gamma_{li}) \int_0^t F_{\rho_{li}}(y) dF_{\psi_i}(y) + MF_{\gamma_{li}}(\psi_i) \int_0^t F_{\rho_{li}}(y) dF_{\gamma_{li}}(y) \right) \right) \right) \times \\ &\times \left(\prod_{j=1}^{N+1} \left(1 - \int_0^t F_{\rho_{2j}}(y) dF_{\gamma_{2j}}(y) \right) \right) \times \\ &\times \left(1 - \left(MF_{\delta}(\gamma_3) \int_0^t F_{\rho_3}(y) dF_{\delta}(y) + MF_{\gamma_3}(\delta) \int_0^t F_{\rho_3}(y) dF_{\gamma_3}(y) \right) \right).\end{aligned}$$

Пусть $\sigma_a(t)$ – интенсивность аварий. Тогда

$$\sigma_a(t) = \frac{dP_a(t)/dt}{1 - P_a(t)}.$$

Таким образом, были получены выражения для вычисления вероятности аварии и интенсивности аварий распределенной вычислительной системы на интервале времени $[0, t]$.

То, что показатели надежности были получены без каких-либо предположений о числе клиентов в системе и о законах распределения наработок на отказ, позволяет говорить о точности результатов.

Анализ распределенных вычислительных систем, которые моделируются как набор сервисов, предоставляемых сервером клиентским процессам, является важной задачей. Сбор и хранение данных – дорогостоящие процедуры, поскольку часто данные стоят больше, чем распределенная вычислительная система, на которой они обрабатываются. Предлагаемые процедуры надежного анализа распределенных вычислительных систем позволяют уже на этапе проектирования предотвратить излишнее дублирование данных (для предотвращения их потери вследствие ненадежности системы) и избежать дополнительных усилий и финансовых затрат.

Предлагаемые модели могут быть использованы в современных технологиях разработки распределенных вычислительных систем, критических по обеспечению безопасности. Рассмотренный в работе набор показателей, используемых при анализе архитектурной надежности распределенных вычислительных систем, может корректироваться, так как наиболее подходящие показатели для конкретной системы определяются в зависимости от типа системы и предметной области знаний. Более того, для различных систем могут использоваться разные показатели.

В результате можно сделать следующие выводы.

1. Модель анализа распределенных вычислительных систем клиент-серверной архитектуры позволяет, в отличие от существующих моделей и методов оценки надежности, без каких-либо предположений о законах распределения случайных величин и числе эле-

ментов в системе получить соотношения для показателей надежности распределенной вычислительной системы.

2. Данная модель позволяет вместо функций распределения, выраженных в аналитическом виде, воспользоваться их статистическими эквивалентами, найденными экспериментально, что особенно полезно при расчете показателей надежности распределенных вычислительных систем.

3. Надежностный анализ распределенных вычислительных систем архитектуры «клиент-сервер» может использоваться для оценки надежности систем для возможных архитектурных изменений и выбора надежной архитектуры из набора вариантов, так как в зависимости от количества и величины компонентов условные и безусловные вероятности сбоя, доступа, анализа и времени восстановления, а также и времени использования компонентов различны.

Библиографические ссылки

1. Антамошкин О. А. Технология утилизации ресурсов распределенных вычислительных сетей // Системы управления и информационные технологии. 2012. № 2.2. С. 220–224.
2. Юнусов Р. В. Оценка надежности программного обеспечения клиент-сервер на примере комплексной системы управления предприятием «Галактика» // Вестник НИИ СУВПТ. 2001. Вып. 7. С. 107–112.
3. Ковалев И. В., Царев Р. Ю., Завьялова О. И. Анализ архитектурной надежности программного

обеспечения информационно-управляющих систем // Приборы. 2010. № 11. С. 24–26.

4. Юнусов Р. В. Анализ надежности аппаратно-программного информационно-управляющего комплекса // Вестник НИИ СУВПТ. 2003. Вып. 11. С. 103–106.

5. Модели и методы оптимизации сбора и обработки информации / И. В. Ковалев, Н. А. Распопин, М. В. Карасева, П. В. Зеленков, Е. В. Каюков // Вестник СибГАУ. 2012. № 2 (42). С. 69–72.

6. Антамошкин О. А., Нургалиева Ю. А., Усачев А. В. Модели модульной декомпозиции программного обеспечения технологических циклов управления // Вестник СибГАУ. 2009. № 3. С. 66–69.

7. Практическая реализация надежностного анализа архитектуры программной системы / Е. В. Гражданцев, М. А. Русаков, О. И. Завьялова, Р. Ю. Царев // Вестник СибГАУ. 2008. № 1 (18). С. 37–40.

8. Русаков М. А., Царев Р. Ю. Методы повышения надежности программного обеспечения // В мире научных открытий. 2011. № 8 (20). С. 32–41.

9. Оценка транзакционной надежности современных систем управления и обработки информации / Р. Ю. Царев, А. В. Штарик, Е. Н. Штарик, О. И. Завьялова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 6. С. 29–32.

© Царев Р. Ю., Пупков А. Н., Огнерубова М. А., Сержантова М. В., Бесчастная Н. А., 2013

УДК 681.34

ПРЯМОЙ И ОБРАТНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ*

Р. Ю. Царев¹, А. В. Штарик², Е. Н. Штарик², Е. Р. Хасанов¹, Т. А. Панфилова¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: rahatamatahata@mail.ru

²Сибирский федеральный университет
660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: alex007p@yandex.ru

Представлены прямой и обратный алгоритмы расчета модифицированных ГЕПТ-сетей, используемые для анализа вероятностно-временных характеристик стохастических сетей.

Ключевые слова: распределенные вычисления, ГЕПТ-сеть, модифицированная ГЕПТ-сеть.

DIRECT AND INVERSE ALGORITHMS OF STOCHASTIC NETWORK CALCULATION

R. Yu. Tsarev¹, A. V. Shtarik², E. N. Shtarik², E. R. Khasanov¹, T. A. Panfilova¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: rahatamatahata@mail.ru

²Siberian Federal University
26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: alex007p@yandex.ru

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0116 «Модели, методы и алгоритмы синтеза и управления развитием кластерных структур АСУ космических систем связи и навигации».

The paper presents direct and inverse algorithms of modified GERT-network calculation used for analysis of probabilistic-time characteristics of stochastic networks.

Keywords: grid computing, GERT-network, modified GERT-network.

Один из подходов к организации процесса интенсивной обработки информации – это использование в качестве узлов обработки информации компьютеров пользователей в свободное от использования времени. Такие проекты, как SETI, Climate Predictions, Legion или Condor, получают все большее распространение и весьма эффективны для некоторых задач [1; 2].

В случае когда для некоторого узла известна вероятность бесперебойной работы в течение времени, необходимого для расчета задачи, то рассчитать функцию распределения времени выполнения задачи можно, используя ГЕРТ-сети [3].

В процессе исследования стала очевидной возможность модификации математической модели ГЕРТ-сетей. Полученная модифицированная модель позволяет оценить время одновременного выполнения задачи на нескольких узлах (рабочих станциях) гетерогенной распределенной системы обработки информации.

Математическая модель модифицированных ГЕРТ-сетей. Для того чтобы дать определение математической модели модифицированной ГЕРТ-сети, введем следующие обозначения [4]:

p_i – вероятность активации узла i ;

p_{ij} – функция условной вероятности активации узла j , при условии активации узла i , $p_{ij} = 1$, если узел i имеет детерминированный выход или $\langle i, j \rangle$ – единственная дуга стохастического выхода;

p_{ijn} – вероятность выполнения начала дуги $\langle i, j \rangle$ при условии, что узел, из которого она входит, активирован;

p_{ijk} – вероятность выполнения конца дуги $\langle i, j \rangle$ при условии, что узел, в который она входит, активирован;

$F_i(t)$ – функция распределения времени выполнения узла i в момент его активации;

$F_{ij}(t)$ – функция условной вероятности распределения времени выполнения работы $\langle i, j \rangle$;

$F_{ijn}(t)$ – функция распределения времени выполнения t_i в начале дуги $\langle i, j \rangle$ при условии, что узел, из которого она входит, активирован;

$F_{ijk}(t)$ – функция распределения времени выполнения t_j на конце дуги $\langle i, j \rangle$ при условии, что узел, в который она входит, активирован.

Также для модифицированных ГЕРТ-сетей (МГ-сетей) справедливы следующие ограничения [4; 5]:

Ограничение 1' (O1'): в течение каждого выполнения проекта для каждого стока активируется не более одного источника, из которого данный сток достижим.

Ограничение 2' (O2'): для каждого узла i МГ-сети, если узел i активирован, то параметры всех выходящих из него дуг вычислимы.

Ограничение 3' (O3'): для каждого узла k произвольной циклической структуры C существует путь из k к узлу вне C такой, что $p_{ij} > 0$ для каждой дуги

$\langle i, j \rangle$ данного пути. Иными словами, есть из каждого цикла есть выход с положительной вероятностью.

Ограничение 4' (O4'): для всякого узла i ГЕРТ-сети G , имеющего IOR- или AND-вход, для любых $j, k \in P(i)$, $Pr(i, j, k) = \{l\}$, причем l – единственный узел и l имеет детерминированный выход.

Ограничение 5' (O5'): для всякого узла i ГЕРТ-сети G , имеющего детерминированный вход, для любых $j, k \in S(i)$, $Sc(i, j, k) = \{l\}$, причем l – единственный узел и l имеет AND- или IOR-вход.

Ограничение 6' (O6'): реализация сети является допустимой, если в процессе выполнения узел i активируется с вероятностью, большей $\max P_i > 0$ и не более, чем $\max A_i \geq 1$ раз; узел i имеет EOR-вход, если в узел i циклической структуры C входит более одной дуги и хотя бы одна дуга не принадлежит циклу C ; узел i имеет стохастический выход, если из узла i циклической структуры C выходит более одной дуги и хотя бы одна дуга не принадлежит циклу C ; узел j с детерминированной выходной функцией, являющийся стохастическим началом узла i , принадлежит циклу, если узел i с IOR- или AND-входом принадлежит данному циклу.

Будем называть ГЕРТ-сеть G (V – множество вершин, E – множество направленных ребер) МГ-сетью, если:

- 1) G имеет единственный источник и, по крайней мере, один сток;
- 2) сеть G удовлетворяет ограничениям O1'–O4';
- 3) задано множество параметров для каждого узла сети (по крайней мере, вероятность активации);
- 4) для каждой дуги указаны функции преобразования параметров узлов;
- 5) источник активируется в момент времени 0 (если параметр, отвечающий за время, определен).

Математическая модель модифицированных ГЕРТ-сетей изначально создавалась таким образом, чтобы всякая МГ-сеть, удовлетворяющая O1'–O4' и для которой заданы дополнительные ограничения O6', была бы вычислима при помощи некоторого алгоритма. По своей сути O1'–O4' гарантируют однозначность построения и расчета графа реализации, а O6' – конечность количества этих реализаций.

Рассмотрим МГ-сеть с вектором веса дуг $[p_{ij}, F_{ij}]$ [6], тогда p_{ijk} и $F_{ijk}(t)$ для дуги $\langle i, j \rangle$ имеют вид

$$p_{ijk} = p_{ijn} \cdot p_{ij};$$

$$F_{ijk}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_{ijn}(s) \cdot F_{ij}'(t-s) ds = F_{ijn} \oplus F_{ij}. \quad (1)$$

Если считать, что случайная величина $t > 0$, то пределы интегрирования можно заменить на 0 и t соответственно.

Для EOR-входа p_j и $F_j(t)$ имеют вид

$$p_j = p_{ijk}; F_j(t) = F_{ijk}(t). \quad (2)$$

где j – вычисляемый EOR-вход, имеющий начало в узле i .

Для AND-входа p_j и $F_j(t)$ имеют вид

$$\begin{aligned} p_j &= p_{l_1, m_{1k}} \cdot p_{l_2, m_{2k}} \times \dots \times p_{l_N, m_{Nk}} / p_i^{N-1}; \\ F_j(t) &= \max(t_{l_1, m_{1k}}, t_{l_2, m_{2k}}, \dots, t_{l_N, m_{Nk}}) = \\ &= F_{l_1, m_{1k}}(t) \cdot F_{l_2, m_{2k}}(t) \times \dots \times F_{l_N, m_{Nk}}(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где j – вычисляемый AND-вход, имеющий стохастическое начало в узле i ; $\{l_1 - m_1\}$, $\{l_2 - m_2\}$, ..., $\{l_N - m_N\} - N$ непересекающихся подсетей.

Для IOR-входа p_j и $F_j(t)$ имеют вид

$$\begin{aligned} p_j &= p_i \cdot [1 - (1 - p_{l_1, m_{1k}})(1 - p_{l_2, m_{2k}}) \times \dots \times (1 - p_{l_N, m_{Nk}})]; \\ F_j(t) &= \min(t_{l_1, m_{1k}}, t_{l_2, m_{2k}}, \dots, t_{l_N, m_{Nk}}) = \\ &= 1 - (1 - F_{l_1, m_{1k}}(t))(1 - F_{l_2, m_{2k}}(t)) \times \dots \times (1 - F_{l_N, m_{Nk}}(t)), \end{aligned} \quad (4)$$

где j – вычисляемый IOR-вход, имеющий стохастическое начало в узле i .

Формулы (1)–(4) позволяют рассчитать любой граф реализации, удовлетворяющий ограничениям О1'–О4'.

Результатом расчета сети будет множество реализаций W_r , сгруппированное по стокам i_r . Для стока в каждой реализации будет рассчитана вероятность наступления события (вероятность возникновения реализации), функция распределения времени выполнения данной реализации и т. д. Пусть r – элемент множества реализаций со стоком i .

Вероятность активации стока i :

$$P_i = \sum_r p_i^r. \quad (5)$$

Вероятность активации стока i ко времени t в реализации r :

$$P_{i,r}(t) = p_i^r \cdot F_i^r(t). \quad (6)$$

Вероятность активации стока i ко времени t :

$$P_i(t) = \sum_r p_i^r \cdot F_i^r(t). \quad (7)$$

Математическое ожидание времени активации стока i :

$$E(t_i) = \frac{\sum_r [p_i^r \cdot \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot dF_i^r(t)]}{\sum_r p_i^r}. \quad (8)$$

Математическое ожидание времени выполнения всей сети:

$$E(t) = \frac{\sum_i \sum_r [p_i^r \cdot \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot dF_i^r(t)]}{\sum_i p_i^r}. \quad (9)$$

Дисперсия времени активации стока i :

$$D(t_i) = \frac{\sum_r [p_i^r \cdot (\int_{-\infty}^{\infty} (t - E(t_i))^2 \cdot dF_i^r(t))]}{\sum_r p_i^r}. \quad (10)$$

Дисперсия времени выполнения всей сети:

$$D(t) = \frac{\sum_i \sum_r [p_i^r \cdot (\int_{-\infty}^{\infty} (t - E(t_i))^2 \cdot dF_i^r(t))]}{\sum_i p_i^r}. \quad (11)$$

Принятые обозначения, используемые для записи алгоритмов. Для записи узлов, дуг и относящихся к ним величин и функций используем обозначения, принятые для структур вида «[структура].[параметр]».

Пусть Prs и DFs – множества вещественных и стохастических параметров соответственно. Каждый узел графа реализации будет обладать данными параметрами. Параметр p (вероятность активации узла) является одним из элементов множества Prs ($p \in Prs$).

Для узла $v \in V$ графа МГ-сети $G = \langle E, V \rangle$:

$v.a$ – количество активаций узла v в процессе построения реализации;

$v.In$ – тип входной функции узла (EOR, IOR или AND);

$v.Out$ – тип выходной функции узла (STOCH или DET);

$v.InF(F)$ – тип входной функции узла для стохастических переменных с функцией распределения F (AND, IOR, MIN, MAX, EQUAL) (только для узлов с IOR- или AND-входом);

$v.P$ – множество узлов, являющихся предками узла v ;

$v.S$ – множество узлов, являющихся потомками узла v ;

$v.MaxA$ – максимально допустимое количество активаций узла v в графе реализации;

$v.MaxP$ – минимально допустимая вероятность события «узел v активирован»;

$v.dR$ – узел, являющийся детерминированным источником узла v ;

$v.dS$ – узел, являющийся детерминированным стоком узла v (только для прямого алгоритма расчета МГ-сети).

Для дуги $e \in E$ графа МГ-сети $G = \langle E, V \rangle$ ($e = \langle v_1, v_2 \rangle$):

$e.v_1$ – узел-начало дуги;

$e.v_2$ – узел-конец дуги;

$e.F_Pr(Pr_i)$ – функция преобразования параметра $Pr_i \in Prs$, зависящая от параметров Prs и DFs ;

$e.F_DF(F_i)$ и $e.F_DF_op(F_i)$ – функция распределения для стохастической переменной, заданной функцией распределения F_i и операция для нее («+», «-» или «=») соответственно.

Для графа реализации w :

$W = \{w_i\}$ – множество графов реализации;

$w.H$ – начальный узел графа реализации w ;

$w.T$ – конечный узел графа реализации w ;

x – узел графа реализации, где $x \in w$;

$x.v$ – узел МГ-сети, которому соответствует узел графа реализации ($x.v \in V$);

$x.Prs$ – значения вещественных параметров узла графа реализации;

$x.DFs$ – значения стохастических параметров узла графа реализации;

$w = \{x\}$ – граф реализации, состоящий из единственного узла x . Тогда $w.H = w.T = x$.

Введем операции построения графа реализации:

$w = M(w_1, w_2)$ – новый граф реализации сети, являющийся объединением графов w_1 и w_2 дугой из $w_2.H$ в $w_1.T$. Частным случаем данной операции будем считать $M(x, w) = M(\{x\}, w)$ и $M(w, x) = M(w, \{x\})$.

$w = M(w_1, W, w_2)$ – новый граф реализации сети, являющийся объединением дугами конечного узла $w_1.T$ со всеми начальными узлами $w_i.H$ ($w_i \in W$) и объединением дугами конечных узлов $w_i.T$ с начальным узлом $w_2.H$.

Обратный алгоритм расчета модифицированных ГЕРТ-сетей. Общая идея обратного алгоритма расчета МГ-сети [7]:

– обход графа МГ-сети ведется от выбранного стока к источнику;

– обход ведется с помощью рекурсивного алгоритма;

– для каждого узла, имеющего EOR-вход, запускается столько же рекурсивных вызовов процедур (ветвей обхода), сколько дуг входит в данный узел;

– для каждого узла i , имеющего IOR- или AND-вход, запускается рекурсивный вызов процедуры расчета узла j , являющегося детерминированным источником узла i , затем рассчитываются все пути от j к i и, используя найденные пути, строятся все реализации, завершаемые узлом i ;

– расчет вещественных и стохастических переменных производится при «выходе» алгоритма из рекурсии;

– результатом работы главной процедуры «ОРасчитатьСеть» являются множества реализаций для каждого из стоков.

Процедура «ОРасчитатьСеть» для обратного алгоритма расчета модифицированной ГЕРТ-сети

Шаг 1. Для каждой вершины v_i из множества вершин V задать число активаций $v.a$ равное 0 и объявить пустое множество возможных реализаций ($W = \{\}$).

Шаг 2. Для каждого стока vs_i из множества стоков S выполнить процедуру «ОПостроитьРеализацию».

Шаг 3. Объединить полученные реализации W_i в результате шага 2 в результирующее множество W .

Шаг 4. Конец процедуры.

Процедура «ОПостроитьРеализацию» для обратного алгоритма расчета МГ-сети

Шаг 1. Если число активаций текущего узла больше максимально допустимого количества активаций $vs.a > vs.MaxA$, то перейти к шагу 18, иначе – шаг 2.

Шаг 2. Если текущий узел vs указывает на узел источника подсети vs , то перейти к шагу 3, иначе – шаг 4.

Шаг 3. К множеству реализаций W добавим узел графа реализации x , для которого: $x.v = vs$, $x.Prs = vs.Prs$, $x.DFs = vs.DFs$. Перейти к шагу 18.

Шаг 4. Увеличить $vs.a$ на 1.

Шаг 5. Если типом входной функции текущего узла $vs.In$ является входная функция типа EOR, то перейти к шагу 6, иначе – шаг 12.

Шаг 6. Для множества узлов, являющихся предками текущего узла vs , выполнить процедуру «ОПостроитьРеализацию».

Шаг 7. Объединить полученные в результате шага 6 множества графов реализаций W_i во множество $W1$.

Шаг 8. Для каждого узла графа реализации $W1$ $x.v = vs$.

Шаг 9. Для пар узлов графа реализации $W1$ x и vs выполнить процедуру «Рассчитать дугу».

Шаг 10. Парно объединить графы реализаций $W1$ с $M(w_i, x_i)$ во множество $W2$, где i от 1 до $|W1|$, перейти к шагу 17.

Шаг 11. Для детерминированного источника текущего узла $vs.dR$ выполнить процедуру «ОПостроитьРеализацию».

Шаг 12. Для каждого узла xs_i графа реализации Ws , полученного в результате выполнения шага 11, выполнить процедуру «ОПостроитьРеализацию».

Шаг 13. Для каждого графа реализации $w2_i$ из множества графов реализаций $Ws2$, полученных в результате выполнения шага 12, удалить первый узел.

Шаг 14. Для всех возможных пар узлов из $Ws2$ выполнить процедуру «Рассчитать дугу».

Шаг 15. Для каждого узла x множества графов реализаций $Ws2$: $x.v = vs$ – определить параметры узла графа реализации $x.Prs$ и $x.DFs$ по множеству $\{ws2_i\}$, используя формулы (1)–(4), (8), (10).

Шаг 16. Парно объединить графы реализаций $Ws2$ с $M(ws2_i, xs2_i)$ во множество $W2$, где i от 1 до $|Ws2|$.

Шаг 17. Уменьшить $vs.a$ на 1.

Шаг 18. Конец процедуры.

Процедура «Рассчитать дугу» расчета МГ-сети

Шаг 1. $e = \langle v1, v2 \rangle$, $Prs2(p) = Prs1(p) * e.F_Pr(p)$, где $v1, v2$ – узлы, являющиеся началом и концом дуги; $Prs1, Prs2$ – множества вещественных параметров начала и конца дуги соответственно; $DFs1, DFs2$ – множества стохастических параметров начала и конца дуги соответственно.

Шаг 2. Для каждого Pr_i из $Prs1$, при $Pr_i \neq p$ выполнить: $Prs2(Pr_i) = e.F_Pr(Pr_i)(Prs1, DFs1)$.

Шаг 3. Для каждого F_i из $DFs1$ рассчитать $DFs2(F_i)$ по формулам (1)–(11), используя значения $Prs1, DFs1, e.F_DF(F_i), e.F_DF_op(F_i)$.

Шаг 4. Конец процедуры.

Прямой алгоритм расчета модифицированных ГЕРТ-сетей. Общая идея прямого алгоритма расчета МГ-сети:

– обход графа МГ-сети ведется от источника к стокам;

– обход ведется с помощью рекурсивного алгоритма;

– для каждого узла, имеющего стохастический выход, запускается столько же рекурсивных вызовов процедур (ветвей обхода), сколько дуг выходит из данного узла;

– для каждого узла i , имеющего детерминированный выход, рассчитываются все пути от i к j , и, используя найденные пути, строятся все реализации,

завершаемые узлом j , где j – детерминированный сток узла i ;

- расчет вещественных и стохастических переменных производится при «углублении» алгоритма рекурсии;

- результатом работы главной процедуры «ПРассчитатьСеть» являются множества реализаций.

Следует отметить, что для использования прямого алгоритма расчета МГ-сети необходимо выполнение ограничения О5'.

Процедура «ПРассчитатьСеть» для прямого алгоритма расчета модифицированной ГЕРТ-сети

Шаг 1. Для каждой вершины v_i из множества вершин V задать число активаций $v.a$, равное 0, и объявить множество возможных реализаций $Wt = \{x\}$, где $x.v = vr$, $x.Prs = iPrs$, $x.DFs = iDfs$ (vr – узел-источник МГ-сети; $iPrs$ и $iDfs$ – начальные значения параметров в узле-источнике).

Шаг 2. Для каждого стока vs_i из множества стоков S , используя множество реализаций Wt , выполнить процедуру «ППостроитьРеализацию».

Шаг 3. Объединить полученные реализации Wt_i в результате шага 2 в результирующее множество W .

Шаг 4. Конец процедуры.

Процедура «ППостроитьРеализацию» для прямого алгоритма расчета МГ-сети

Шаг 1. Если Wc (множество реализаций, построенное от источника до узла vc) пустое множество, то перейти к шагу 23, иначе – шаг 2.

Шаг 2. Если число активаций текущего узла больше максимально допустимого количества активаций $vc.a > vc.MaxA$, то перейти к шагу 3, иначе – шаг 4.

Шаг 3. $Wc = \{\}$, перейти к шагу 23.

Шаг 4. Если vc указывает на узел источник подсети vs , то перейти к шагу 5, иначе – шаг 6.

Шаг 5. Объединить результирующее множество реализаций сети W с множеством Ws , $Ws = \{\}$, перейти к шагу 23.

Шаг 6. Увеличить $vc.a$ на 1.

Шаг 7. Если тип выходной функции текущего узла – стохастическая функция ($vc.Out = Stoch$), то перейти к шагу 8, иначе – шаг 13.

Шаг 8. Объявить пустые множества реализаций Wt и $Wt1$.

Шаг 9. Для пар текущий узел (vc) и сток текущего узла (v_i из $vc.S$) выполнить процедуру «Рассчитать дугу».

Шаг 10. Объединить множества $M(w_k, x)$ в Wt , где w_k – графы реализации из множества Wc и x – стоки текущего узла ($x.v = v_i$ из $vc.S$)

Шаг 11. Для каждого стока текущего узла (v_i из $vc.S$), используя множество реализаций Wt , полученное на предыдущем шаге, выполнить процедуру «ППостроитьРеализацию».

Шаг 12. Объединить полученные множества реализаций $Wt1$ в результате шага 11 с результирующим множеством W , перейти к шагу 22.

Шаг 13. Объявить пустое множество реализаций $Wt2$.

Шаг 14. Для пар текущий узел (vc) и сток текущего узла (v_i из $vc.S$) выполнить процедуру «Рассчитать дугу».

Шаг 15. Объявить множество реализаций $Wt = \{x\}$, где x – стоки текущего узла ($x.v = v_i$ из $vc.S$).

Шаг 16. Для каждого стока текущего узла (v_i из $vc.S$), используя множество реализаций Wt , полученное на предыдущем шаге, выполнить процедуру «ППостроитьРеализацию».

Шаг 17. Для каждого графа реализации $w2_i$ из множества графов реализации $W2$, полученных в результате выполнения шага 16, удалить последний узел.

Шаг 18. Для всех возможных пар узлов из $W2$ выполнить процедуру «Рассчитать дугу».

Шаг 19. Для узла $vc.dS$, являющегося детерминированным стоком текущего узла vc , определить параметры узла графа реализации $x.Prs$ и $x.DFs$ по множеству графов $\{w2_i\}$, используя формулы (1)–(4), (8), (10).

Шаг 20. Объединить множества $M(w_k, \{w2_i\}, x)$ в $Wt2$, где w_k – графы реализации из множества Wc , $w2_i$ – графы реализаций из множества $W2$ и x – стоки текущего узла ($x.v = v_i$ из $vc.S$).

Шаг 21. Для узла $vc.dS$, являющегося детерминированным стоком текущего узла vc , используя множество реализаций $Wt2$, полученное на предыдущем шаге, выполнить процедуру «ППостроитьРеализацию».

Шаг 22. Уменьшить $vc.a$ на 1.

Шаг 23. Конец процедуры.

Сравнение производительности прямого и обратного алгоритмов расчета модифицированной ГЕРТ-сети. Приведем качественное сравнение производительности прямого и обратного алгоритмов расчета стохастической сети. Выполнить количественную оценку производительности алгоритмов для произвольной сети не представляется возможным.

Время работы программ, использующих прямой и обратный алгоритмы обхода МГ-сети, в основном формируется из времени выполнения трех операций: обхода графа сети, дублирования множества реализаций и расчета параметров узлов графа реализаций.

Время выполнения алгоритма обхода графа МГ-сети примерно одинаково для прямого и обратного алгоритмов.

В ходе практических испытаний над различными сетями произвольного вида выявлено, что алгоритм на базе прямого обхода графа всегда не медленнее по производительности алгоритма на базе обратного обхода графа. Однако, как уже отмечалось выше, область его применения уже (требует выполнения О5').

Один из способов повышения точности расчетов интегральной свертки при анализе вероятностно-временных характеристик стохастических сетей заключается в том, чтобы дать возможность использовать аналитически заданные функции распределения в качестве стохастических параметров (весов) дуг сети.

Предложенный способ представления функций распределения стохастических параметров при анали-

зе вероятностно-временных характеристик стохастических сетей и численные методы расчета параметров дуг позволяют создать универсальный программный модуль расчета произвольной стохастической сети.

Прямой алгоритм расчета стохастической сети занимает время выполнения меньшее или равное времени выполнения обратного алгоритма. Однако прямой алгоритм может быть использован только при выполнении ограничения О5'. Проверка выполнения данного ограничения может выполняться как исследователем, так и программным путем. Прямой алгоритм дает выигрыш в быстродействии, если сеть имеет хотя бы один цикл.

Библиографические ссылки

1. Управление развитием надежных кластерных структур информационных систем / И. В. Ковалев, Н. Н. Джигоева, А. В. Прокопенко, Р. Ю. Царев // Программные продукты и системы. 2010. № 2 (90). С. 68–71.
2. Оценка транзакционной надежности современных систем управления и обработки информации / Р. Ю. Царев, А. В. Штарик, Е. Н. Штарик, О. И. За-

вьялова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 6. С. 29–32.

3. Письман Д. М., Дегтерев А. С. GERT-сетевой анализ времени выполнения задачи на неспециализированном гетерогенном кластере // Фундаментальные исследования. 2005. № 4. С. 79–80.

4. Царев, М. Ю., Царев Р. Ю., Шевчук С. Ф. Модификация GERT-сети для анализа временных характеристик сетевых моделей // Вестник СибГАУ. 2009. № 1 (22). Ч. 2. С. 74–78.

5. Письман, Д. М. Анализ временных параметров сетевых моделей на базе модифицированной GERT-сети // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2006. № 1. С. 18–26.

6. Анализ вероятностно-временных характеристик отказоустойчивого программного обеспечения распределенных вычислительных систем / Р. Ю. Царев, А. В. Штарик, Е. Н. Штарик, М. А. Кочергина, Т. А. Панфилова // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 64–70.

7. Письман Д. М., Шабалин С. А. Алгоритм расчета модифицированной GERT-сети // Успехи современного естествознания. 2005. № 11. С. 36–37.

© Царев Р. Ю., Штарик А. В., Штарик Е. Н., Хасанов Е. Р., Панфилова Т. А., 2013

УДК 512.54

ГРУППЫ НАСЫЩЕННЫЕ $GL_2(q)$

А. А. Шлепки

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: shlyopkin@mail.ru

Получена структура бесконечных локально конечных групп насыщенных полными линейными группами размерности два над конечными полями.

Ключевые слова: группы, насыщенные множеством групп.

GROUP SATURATED $GL_2(q)$

A. A. Shlepk

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: shlyopkin@mail.ru

The author presents the obtained structure of infinite local- finite groups saturated with complete linear groups of 2 dimensionality off the finite fields.

Keywords: groups saturated with set of groups.

Группа G насыщена группами из множества X , если любая конечная подгруппа K из G содержится в подгруппе группы G , изоморфной некоторой группе из X [1].

В работах [2; 3] изучались периодические группы с дополнительными условиями конечности, насыщенные множеством $\{GL_2(3^n)\}$. В данной работе продолжены исследования в этом направлении.

Пусть $\mathfrak{Z} = \{GL_2(p^n)\}$. Отметим, что ни характеристика p конечного поля, ни натуральное n не фиксируется. Доказана следующая.

Теорема. Локально конечная группа G насыщенная группами из множества $\mathfrak{Z}$, изоморфна $GL_2(P)$ для некоторого локально конечного поля P .

Известные факты и определения.

Предложение 1. Пусть $L = GL_2(q)$, где $q = 2^n$.

Тогда:

1. $R = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & \alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \alpha \in GF(q) \right\}$ – силовская 2-под-

группа группы L .

2. $N_L(R) = R \rtimes (Z \times T)$, где $Z = \left\langle \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{pmatrix} \right\rangle$ –

центр группы L , $T = \left\langle \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\rangle$, $|T| = q-1$.

3. R – абелева группа периода 2 и $R \subset SL_2(2^n)$.

4. $C_L(R) = (R \times Z)$.

5. $N_L(Z \times T) = Z \times T \rtimes \langle \omega \rangle$, где $\omega = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

6. Все силовские 2-подгруппы группы L сопряжены и пересекаются тривиально.

7. Пусть $M = \langle a \rangle \times \langle b \rangle$, где $|a| = |b| = k > 2$ подгруппы L . Тогда k делит $q-1$ и для некоторого $g \in L$ $M^g \subset (Z \times T)$ и $N_L(M) = N_L(Z \times T)$.

8. $L = L_2(2^n) \times Z$.

9. $\bar{L} = \frac{L}{Z(L)} \cong L_2(2^n)$ [4].

Предложение 2. Пусть $G = L_2(q)$, где $q = 2^n > 2$ и P – силовская 2-подгруппа группы G . Тогда:

1. P – элементарная абелева группа, и любые две различные силовские 2-подгруппы группы G пересекаются тривиально.

2. $C_G(a) = P$ для любой инволюции $a \in P$.

3. $N_G(P) = P \rtimes H$ – максимальная подгруппа в G , являющаяся группой Фробениуса с ядром P и циклическим дополнением H порядка $q-1$, действующим транзитивно на множестве инволюции из P .

4. $N_G(H)$ – группа диэдра порядка $2(q-1)$.

5. Если K – подгруппа в G и K обладает нетривиальной нормальной подгруппой нечетного порядка, то $N_G(K)$ – группа диэдра порядка $2(q-1)$ или $2(q+1)$ [5].

Предложение 3. Пусть $L = GL_2(q)$, где $q = p^n$ и p – нечетно. Тогда

1. $R = \left\{ \begin{pmatrix} 1 & \alpha \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \alpha \in GF(q) \right\}$ – силовская p -под-

группа группы L .

2. $N_L(R) = R \rtimes (Z \times T)$, где $Z = \left\langle \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{pmatrix} \right\rangle$ – центр

группы L , $T = \left\langle \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right\rangle$, $|T| = q-1$.

3. R – абелева группа периода p и $R \subset SL_2(p^n)$.

4. $C_L(R) = (R \times Z)$.

5. $N_L(Z \times T) = (Z \times T) \rtimes \langle \omega \rangle$, где $\omega = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$.

6. Все силовские p -подгруппы группы L сопряжены и пересекаются тривиально.

7. Пусть $M = \langle a \rangle \times \langle b \rangle$, где $|a| = |b| = k > 2$ подгруппы L . Тогда k делит $q-1$ и для некоторого $g \in L$ $M^g \subset (Z \times T)$ и $N_L(M) = N_L(Z \times T)$.

8. $L = SL_2(p^n) \rtimes T = (SL_2(p^n)Z) \rtimes \langle t \rangle$, где $t = \begin{pmatrix} h & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ и h элемент поля $GF(p^n)$ из которого не

извлекается корень квадратный.

9. Если $q \equiv -1 \pmod{4}$, то $L = (SL_2(q) \cdot Z) \rtimes \langle \omega \rangle$.

10. Если $q \equiv 1 \pmod{4}$ то $L/Z(L) = L_2(p^n \rtimes \langle \bar{v} \rangle)$,

где $\bar{v}$ инволюция, являющаяся образом элемента $v = t\omega$ при гомоморфизме $L \rightarrow L/Z(L)$ [4].

11. Если $q \equiv 1 \pmod{4}$, $2^s - 2$ часть числа $q-1$, ξ – примитивный корень степени 2^s из 1 в $GF(q)$ то силовская 2-подгруппа S -порядка 2^{s+1} является сплетением групп Z_{2^s} и Z_2 и

$S = \left\langle \begin{pmatrix} \xi & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \xi \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \right\rangle$.

12. Если $q \equiv -1 \pmod{4}$, $2^s - 2$ часть числа $q+1$, ξ – примитивный корень степени 2^{s+1} из 1 в $GF(q^2)$ то силовская 2-подгруппа S – является полудиэдральной группой порядка 2^{s+2} и

$S = \left\langle \begin{pmatrix} \xi & 0 \\ 0 & \xi + \xi^q \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \right\rangle$ [4].

Предложение 4. Группа $L_2(q)$, где $q = p^n$ – степень простого числа p , имеет следующие подгруппы:

1) $q+1$ сопряженных абелевых элементарных подгрупп порядка q ;

2) $(q \pm 1)/2$ сопряженных циклических подгрупп порядка $\frac{(q \pm 1)}{2; 1}$, 2 и 1 берутся в знаменателе согласно $p > 2$ и $p = 2$; $Z(G)$.

3) $q(q \pm 1)/2$ сопряженных циклических подгрупп порядка $q_{\mp}, q_{\mp}$ делит $\frac{q-1}{2; 1}$;

4) $M(q)/2d_{\mp}$ сопряженных групп диэдра порядка $2d_{\mp}$, где $d_{\mp}$ – нечетное число и $M(q) = q(q^2 - 1)$ для $p = 2$ и $M(q) = q(q^2 - 1)/2$ для $p > 2$;

5) две системы, каждая из $M(q)/4d_{\mp}$ сопряженных групп диэдра порядка $2d_{\mp}$, где $d_{\mp}$ – нечетное число, большее 2;

6) для $p^n = 8h \pm 3$ одно множество из $M(q)/12$ сопряженных нециклических подгрупп порядка 4;

7) $\frac{(p^n-1)(p^n-p)\dots(p^n-p^{m-1})}{(p^m-1)(p^m-p)(p^m-p^{m-1})}$ множеств, каждое из $\frac{p^{2n}-1}{(2,1;1)(p^k-1)}$ сопряженных коммутативных групп порядка p_m , где $(2,1;1)$ означает 2,1 или 1 согласно одному из случаев: $p > 2$ и четное число, $p > 2$ и n/k – нечетное число; или $p = 2$ и n/k – целое число; k делитель m , зависящий от свойств группы порядка p^m

8) множество из $\frac{(p^n-1)p^{n-m}}{(2,1;1)(p^k-1)}$ сопряженных групп Фробениуса порядка $p^m d$, где k и d зависят от m ;

9) $(2,1;1)$ множеств, каждое из $M(p^k) M(q)/(2,1;1)$ сопряженных подгрупп, изоморфных $PSL(2, p^k)$, k – делитель n ;

10) две системы, каждая из $M(q)/2M(p^k)$ сопряженных подгрупп, изоморфных $PGL(2, p^k)$ – $p > 2$, n/k – четное число;

11) для $q = 8h \pm 1$ два множества, каждое из $M(q)/24$ сопряженных подгрупп S_4 ;

12) для $q = 8h \pm 1$ два множества, каждое из $M(q)/24$ сопряженных подгрупп A_4 ;

13) для $q = 8h \pm 3$ или $q = 2^n$, n – четное число, $M(q)/12$ сопряженных подгрупп A_4 ;

14) для $q = 10l \pm 1$ две системы, каждая из $M(q)/60$ сопряженных подгрупп A_5 [5].

Доказательство теоремы.

Лемма 1. Пусть K_1, K_2 – группы, $K_1 \subset K_2, K_1 \simeq GL_2(p_1^{n_1}), K_2 \simeq GL_2(p_2^{n_2})$. Тогда $Z_1 \subseteq Z_2$, где $Z_1 = Z(K_1)$ – центр K_1 и $Z_2 = Z(K_2)$ – центр K_2 .

Доказательство. Рассмотрим следующие ситуации:

- 1) $p_1 = p_2 = 2$,
- 2) $p_1 = 2, p_2 > 2$,
- 3) $p_1 > 2, p_2 = 2$,
- 4) $p_1 > 2, p_2 > 2$.

Пусть

$$\overline{K_1} = \frac{K_1}{Z(K_2)} = \frac{K_1}{Z(K_2) \cap Z(K_1)},$$

$$\overline{K_2} = \frac{K_2}{Z(K_2)}, \text{ и } \overline{Z_1} = \frac{Z_1}{Z_1 \cap Z_2}.$$

Ясно, что $\overline{K_1} \subseteq \overline{K_2}$.

1) по предложению 1 (пункт 9), $K_2 = L_2(2^{n_2}) \times Z_2$ и $K_1 = (2^{n_1}) \times \overline{Z_1}$. Тогда $\overline{K_2} \simeq L_2(2^{n_2})$ и $\overline{K_1} \simeq L_2(2^{n_1}) \times \overline{Z_1}$. Из предложения 2 (пункты 1, 2) вытекает, что $\overline{Z_1} = 1$. Итак, в ситуации 1 лемма доказана;

2) по предположениям 1–3, $\overline{K_1} = L_2(2^{n_1}) \times \overline{Z_1}$ и $\overline{K_2} = L_2(p_2^{n_2}) \times \langle \overline{t} \rangle$. В силу того что $\overline{K_1}$ порождается $2'$ -элементами, то $\overline{K_1} \subseteq L_2(p_2^{n_2})$. Но из предложения 4 вытекает, что при $\overline{Z_1} \neq 1$ таких подгрупп в $L_2(p_2^{n_2})$ нет. Итак, $\overline{Z_1} = 1$ и в ситуации 2 лемма доказана;

3) по предложениям 1–3, $\overline{K_1} = L_2(p_1^{n_1}) \times \langle \overline{t} \rangle$ и $\overline{K_2}(2^{n_2}) = L_2(2^{n_2})$. Но силовская 2-подгруппа в $\overline{K_2}$ элементарная абелева, а в $\overline{K_1}$ нет (предложение 3, пункт 11, 12, предложение 2, пункт 1). Противоречие. Таким образом, ситуация 3) невозможна;

4) по предложению 3 (пункты 8–10). Следовательно, $\overline{K_1} = (L_2(p_1^{n_1}) \times \overline{Z_1}) \times \langle \overline{t_1} \rangle$, $\overline{K_2} = L_2(p_2^{n_2}) \times \langle \overline{t_2} \rangle$ и $|\overline{t_1}| = |\overline{t_2}| = 2$.

Если $2 \notin \pi(Z_2 \cap Z_1)$, то возьмем инволюцию x_1 из Z_2 и рассмотрим в K_2 подгруппу $R = x_1 \times (\langle x_2 \rangle \times \langle x_3 \rangle)$, где $\langle x_2 \rangle \times \langle x_3 \rangle$ подгруппа порядка 4 из K_1 . R лежит в некоторой силовской 2 подгруппе S_2 из K_2 и S_2 , либо полудиэдральная групп, либо группа диэдра (предложение 3, пункты 11, 12). Но в обоих случаях в S_2 нет элементарных абелевых подгрупп порядка 8. Это означает, что $\overline{Z_1}$ содержит инволюцию, а $\overline{K_1}$ содержит элементарную абелеву подгруппу R порядка 8. В силу включения $\overline{K_1} \subset \overline{K_2}$ R лежит в некоторой силовской 2 подгруппе S из $\overline{K_2}$. Но S не содержит подгруппу типа R (предложение 3, пункты 11, 12). Таким образом, $\overline{Z_1}$ нечетного порядка. Следовательно, $L_2(p_1^{n_1}) \times \overline{Z_1} \subseteq L_2(p_2^{n_2})$. Но таких подгрупп в $L_2(p_2^{n_2})$ нет, при $\overline{Z_1} \neq 1$ (предложение 4). Таким образом, $\overline{Z_1} = 1$ и в ситуации 4 лемма доказана.

Лемма доказана.

Лемма 2. Пусть $K \in \mathfrak{S}(1)$. Тогда $Z(K) \subseteq Z(G)$.

Доказательство. Возьмем конечную подгруппу $K \in \mathfrak{S}(1)$. Следовательно, $K \simeq GL_2(p_0^{k_0})$. Пусть $g \in Z(K)$ покажем, что $g \in Z(G)$. Предположим обратное. Тогда найдется такой $x \in G$, что $g^x \neq g$. По условию насыщенности конечная группа $\langle K, x \rangle \subseteq K_1 \simeq GL_2(p_1^{k_1})$.

Пусть $Z_1 = Z(K_1)$. Из леммы 1 вытекает, что $Z(K) \subset Z(K_1)$, а значит, $g^x = g$. Противоречие выбором x .

Лемма доказана.

Лемма 3. $Z(G)$ – локально циклическая группа.

Доказательство. Действительно, пусть $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ – конечно порожденная подгруппа из $Z(G)$. По условию насыщенности $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \subset K_2 \simeq GL_2(p_2^{k_1})$. Ясно, что $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \subset Z_2 = Z_2(K_2)$. Так как Z_2 – циклическая группа, то и $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ – циклическая группа.

Лемма доказана.

Рассмотрим теперь фактор группу $\bar{G} = G/Z$. По лемме 3 и [4] $\bar{G}$ локально конечная группа насыщенная множеством групп $\{GL_2(p^n)/Z(GL_2(p^n))\}$, (предложения 1–3). Рассмотрим в $\bar{G}$ подгруппу $\bar{L}$ порожденную всеми подгруппами $\bar{K}$ такими, что $\bar{K} \simeq L_2(p_i^{n_i})$.

Лемма 4. $\bar{L} \simeq L_2(P)$, где P – подходящее локально конечное поле характеристики p .

Доказательство. Покажем, что группа $\bar{L}$ насыщена множеством $\mathfrak{F}_1 = \{L_2(p_i^{n_i})\}$. Возьмем в $\bar{L}$ конечную подгруппу $\bar{M}$. По определению группы $\bar{L}$, $\bar{M} \subseteq \bar{L}_1, \dots, \bar{L}_i, \dots, \bar{L}_m$ для некоторого набора конечных подгрупп $\bar{L}_i \subset \bar{L}$ таких, что $\bar{L}_i \simeq L_2(p_i^{n_i})$ и $i = \overline{1, m}$. Пусть M и L_i – некоторые конечные прообразы групп $\bar{M}$ и $\bar{L}_i$ в G такие, что $M \subseteq \langle L_1, \dots, L_i, \dots, L_m \rangle$

По условию насыщенности $\langle L_1, \dots, L_i, \dots, L_m \rangle \subseteq N \subset G$ и $N \simeq GL_2(p_{m+1}^{n_{m+1}})$. По предложению 1, (пункт 8) и предложению 3 (пункты 8–10). $\bar{N} = N/Z(G) = \overline{L_{m+1}} \rtimes \langle \bar{t}^\sigma \rangle$, где $\overline{L_{m+1}} \simeq L_2(p_{m+1}^{n_{m+1}})$, $\bar{t}$ – инволюция и $\sigma \in \{0, 1\}$. Итак мы можем записать вложение $\langle \bar{L}_1, \dots, \bar{L}_i, \dots, \bar{L}_m \rangle \subseteq \overline{L_{m+1}} \rtimes \langle \bar{t}^\sigma \rangle = \bar{N}$. Так как все $\bar{L}_i$ конечные простые неабелевы группы, а $\bar{L}_i \cap \overline{L_{m+1}} \triangleleft \bar{L}_i$ (заметим, что $\overline{L_{m+1}} \triangleleft \bar{N}$), то либо $\bar{L}_i \cap \overline{L_{m+1}} = 1$, либо $\bar{L}_i \cap \overline{L_{m+1}} = \bar{L}_i$. Первый случай невозможен, поскольку тогда $|\bar{N} : \overline{L_{m+1}}| \geq |\bar{L}_i| > 2$, а с другой стороны $|\bar{N} : \overline{L_{m+1}}| = |\overline{L_{m+1}} \times \langle \bar{t} \rangle : \overline{L_{m+1}}| = 2$. Противоречие. Следовательно, остается второй случай. Но тогда все $\bar{L}_i$ лежат в $\overline{L_{m+1}}$, а значит, и $\bar{M}$ лежит в $\overline{L_{m+1}}$. Итак, насыщенность $\bar{L}$ группами из множества $\mathfrak{F}_1$ доказана.

По основному результату из [6] $L \simeq L_2(P)$ для некоторого локально конечного поля P характеристики p .

Лемма доказана.

Зафиксируем простое p из леммы 4.

Лемма 5. $|\bar{G} : \bar{L}| \leq 2$.

Доказательство. Если $p = 2$, то утверждение леммы очевидно (предложения 1, 2). Пусть $p \neq 2$. Возьмем в G конечную подгруппу $G_k \simeq GL_2(p^{m_k})$ и рассмотрим ее образ $\bar{G}_k$ в $\bar{G}$. Тогда $\bar{G}_k = \overline{L_k} \rtimes \langle \bar{t} \rangle$, где $\overline{L_k} \simeq L_2(p^{m_k})$, а $\bar{t}$ – инволюция. Если $\bar{t} \in \bar{L}$ для любой $\bar{G}_k$, то $\bar{G}_k \subset \bar{L}$, поскольку $\overline{L_k}$ лежит в $\bar{L}$ по определению, $\bar{G} = \bar{L}$ и $|\bar{G} : \bar{L}| = 1$. Пусть для некоторого $\bar{t} \notin \bar{L}$. Покажем, что $\bar{G} \subseteq \bar{L} \rtimes \langle \bar{t} \rangle$, так как обратное включение очевидно. Действительно, пусть $\bar{g} \in \bar{G}$ а g некоторый его прообраз в G . По условию насыщенности $\langle t, g \rangle \subset G_k \simeq GL_2(p^{m_k})$ и при переходе к $\bar{G}$ получаем $\langle \bar{t}, \bar{g} \rangle \subseteq \bar{G}_k = \overline{L_k} \rtimes \langle \bar{t} \rangle \subset \bar{L} \rtimes \langle \bar{t} \rangle$ где $\overline{L_k} \simeq L_2(p^{m_k})$. Значит $\bar{g} \in \bar{L} \rtimes \langle \bar{t} \rangle$. В силу произвольности выбора $\bar{g}$ получаем $\bar{G} \subset \bar{L} \rtimes \langle \bar{t} \rangle$ и окончательно $\bar{G} = \bar{L} \rtimes \langle \bar{t} \rangle$.

Лемма доказана.

Завершим доказательство теоремы. Пусть $\bar{L}$ и P из условия леммы 4. Так как P – локально конечное поле, то оно счетно. Выберем в P цепочку конечных подполей

$$P_1 \subset P_2 \subset \dots \subset P_i \subset \dots$$

такую, что $\bigcup_{i=1}^{\infty} P_i = P$. Выберем в $\bar{L}$ цепочку конечных подгрупп $\bar{L}_1 \subset \bar{L}_2 \subset \dots$ такую, что $\bar{L}_i \simeq L_2(P_i)$ и $\bigcup_{i=1}^{\infty} \bar{L}_i = \bar{L}$. Обозначим через L_i некоторый конечный прообраз $\bar{L}_i$ в G . Так как $Z(G)$ – локально циклическая группа, то она счетна. Выберем в $Z(G)$ цепочку конечных подгрупп $Z_1 \subset Z_2 \subset \dots \subset Z_i \subset \dots$ такую, что $\bigcup_{i=1}^{\infty} Z_i = Z(G)$. По лемме 5 любой элемент g группы G представим в виде $g = z_i \cup_j t^\sigma$, где $z_i \in Z_i$, $\cup_j \in L_j$, $\sigma \in \{0, 1\}$, и где t – фиксированный элемент четного порядка из G . По условию насыщенности, $\langle z_1, L_1 t \rangle \subset G_1 \simeq GL_2(p^{m_1}) = GL_2(P_1^*)$, где P_1^* – конечное подполе из P и $|P_1^*| = p^{m_1}$ (лемма 4). Предполо-

жим, что мы определили группу $G_l \approx GL_2(p^{m_l})$ для $l \geq 1$. По условию насыщенности, конечная группа $\langle Z_{l+1}, L_{l+1}, G_l \rangle \subset G_{l+1} \approx GL_2(p^{m_{l+1}}) = GL_2(P_{l+1}^*)$, где P_{l+1}^* подполе из P и $|P_{l+1}^*| = p^{m_{l+1}}$ по лемме (4).

По построению

$$G_1 \subset G_2 \subset \dots \subset G_l \subset G_{l+1} \subset \dots, \bigcup_{i=1}^{\infty} G_i = G.$$

$$\text{и} \quad P_1^* \subset P \dots \subset P_l^* \subset P_{l+1}^* \subset \dots, \bigcup_{l=1}^{\infty} P_l^* = P.$$

Значит, $GL_2(P_1^*) \subset GL_2(P_2^*) \subset \dots \subset GL_2(P_l^*) \subset \dots$

$$\text{и} \quad \bigcup_{l=1}^{\infty} GL_2(P_l^*) = GL_2(P).$$

В силу изоморфизма $G_l \approx GL_2(P_l^*)$, получаем, что

$$G = \bigcup_{l=1}^{\infty} G_l \approx GL_2(P).$$

Теорема доказана.

Библиографические ссылки

1. Шлепкин А. К. Сопряженно бипрimitивно конечные группы, содержащие конечные неразрешимые подгруппы // Сб. тезисов 3-й Междунар. конф. по алгебре. Красноярск, 1993. С. 363.
2. Панюшкин Д. Н. Группы Шункова, насыщенные прямыми произведениями различных групп : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск, 2010.
3. Shlyopkin A. A Periodic groups saturated by the groups $GL_2(p^n)$ // Book of abstracts of the Intern. conf. on algebra. Kyiv, 2012. P. 144.
4. Dixon L. Linear groups. Leipzig : B. C. Neubner, 1901.
5. Бусаркин В. М., Горчаков Ю. М. Конечные расщепляемые группы. М. : Наука, 1968.
6. Рубаишин А. Г., Филиппов К. А. О периодических группах насыщенных $L_2 = (p^n)$ // Сиб. мат. журн. 2005. № 6. С. 1432–1438.

© Шлепкин А. А., 2013

УДК 004.773.5

ЗАЩИЩЕННЫЙ ДОСТУП К СИСТЕМАМ ВИДЕОКОНФЕРЕНЦИИ*

К. Е. Шудрова¹, Р. В. Лебедев², В. Ю. Почкаенко³

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: shudrova87@mail.ru

²ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

³Россия, Красноярск, ООО «НПП «Бевард»

Проводится анализ уязвимости «переполнение буфера» для программно-аппаратного комплекса «Метка привилегий». По методике CVSS строится вектор метрик, компоненты которого характеризуют уровень защищенности алгоритма. На основе полученных результатов авторами предлагается модифицировать существующий алгоритм.

Ключевые слова: видеоконференция, уязвимость, CVSS.

SECURE ACCESS TO VIDEO CONFERENCE SYSTEMS

K. E. Shudrova¹, R. V. Lebedev², V. Yu. Pochkaenko³

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: shudrova87@mail.ru

²JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev
52 Lenin street, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

³LLC "NPP" Bevard", Krasnoyarsk, Russia

The authors present vulnerability analysis "buffer overflow" for software and hardware complex "The label of privileges". By the CVSS procedure the metrics based vector is constructed, and its components characterize the level of security of the algorithm. Based on these results the authors suggest to modify the existing algorithm.

Keywords: video conferencing, vulnerability, CVSS.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1800 «Разработка алгоритмов и программных решений организации доступа к мультимедиа конференциям различных типов».

Увеличение пропускной способности каналов передачи информации сделало видеоконференции удобным средством общения. Видеоконференции проводятся для обмена опытом специалистами в различных областях, проведения корпоративных совещаний, также видеосвязь широко используется в образовательных целях. Видеоконференцсвязь – это технология, обеспечивающая обмен аудио- и видеoinформацией в режиме реального времени между участниками территориально распределенной группы. Начало распространения ВКС относится к 1980-м гг. – от телевизионных систем, обеспечивающих интерактивные контакты между удаленными партнерами [1]. Многие видеоконференции предназначены для узкого круга лиц, поэтому необходимо сделать доступ к видео защищенным, исключив возможность несанкционированного доступа (НСД).

Существует большое количество различных систем видеосвязи, обладающих своими достоинствами и недостатками, в данной работе рассматривается программно-аппаратный комплекс (ПАК) «Метка привилегий» [2].

«Метка привилегий». Особенностью ПАК является функция передачи конфиденциальной информации, встраиваемой в стандартный видеопоток стеганографическими методами. Программная часть комплекса представляет собой клиент-серверное приложение, аппаратная часть представлена в виде электронных ключей. В основе работы лежит добавление в пакеты специализированных меток. Модификации происходят на транспортном уровне: протокол TCP. Для внедрения меток в заголовок TCP пакета используется не обязательное поле опций (расположено со 160 по 192 бит) [3]. Добавляются метки трех типов: метка начала специального режима, метка специального пакета, метка последнего пакета.

В обычном режиме пакеты передаются непосредственно от источника адресату, минуя сервер. Перед предполагаемым началом специального режима администратор запускает службу на сервере, сеть переходит в режим ожидания. Принятый пакет проверяется на наличие метки начала специального режима, при положительном результате проверки сеть переходит в специальный режим.

В специальном режиме происходит проверка аутентификационной информации. Если она верна, осуществляется проверка метки специального пакета, при положительном результате пакет доставляется адресату. Затем происходит проверка метки последнего пакета, она означает, что необходимо снять метку начала специального режима, доставить последний пакет и перейти к обычной работе сети. Если аутентификационная информация неверна, пакеты отклоняются.

Клиент запускает службу на своем компьютере и с помощью аппаратного ключа переходит в режимы «источник-сервер» и «сервер-адресат». При отправке сообщений в пакет добавляется информация о пользователе и метка привилегии, скрытые данные, затем пакет отсылается. Принятое сообщение записывается в буфер. Согласно таблице стеганографических преобразований выделяются пакеты со скрытой инфор-

мацией. Происходит сборка конфиденциальной информации.

На начальном этапе работы программы создается дуплексный канал (сокеты), соединяющий два процесса – отправки и передачи данных. На стороне отправителя происходит накопление видеоданных и конфиденциального текста, затем происходит отправка видеоданных с пометкой в первом байте, указывающей тип данных – «видео», после этого отправляются текстовые данные с пометкой в первом байте – «текст». На стороне получателя осуществляется сборка информации и вывод пользователю на экран. Для кодирования видео используется технология MJPEG, после сжатия кадра скрытая информация встраивается путём замены отдельных байтов [4]. Позиции заменяемых байтов вычисляются с помощью секретного ключа.

Видеокодеки MPEG2 и MPEG4 обладают большей степенью сжатия, но занимают большее количество процессорного времени [5]. В разрабатываемой системе необходимо кодировать видео в реальном времени, а встраивание скрытой информации увеличивает время кодирования. Поэтому скорость работы алгоритма является важным параметром при выборе технологии кодирования. Стоит отметить, что MJPEG имеет меньшую степень сжатия, чем MPEG2 или MPEG4 [6], однако преимуществом видеокодека является скорость кодирования. Еще одно преимущество MJPEG перед MPEG2 и MPEG4 – свободная лицензия, она позволяет разрабатывать собственные алгоритмы на основе MJPEG без необходимости лицензирования. По перечисленным выше причинам в качестве основы для разработки собственного алгоритма стегокодирования был выбран MJPEG.

Так как ПАК «Метка привилегий» предназначен для организации защищенного канала передачи конфиденциальной информации, необходимо оценить уровень защищенности системы [7].

Оценка уязвимостей ПАК «Метка привилегий». Оценка актуальных уязвимостей производится по системе CVSS. CVSS (Common Vulnerability Scoring System – Общая система оценки уязвимостей) представляет собой набор методов, позволяющих строить оценки уязвимостей компонент информационных систем (ИС) в едином пространстве мер. Объектом применения этих методов являются единичные (атомарные) уязвимости системного и прикладного программного обеспечения и связанных с ними протоколов взаимодействия. Получение в конечном итоге оценок в рамках единой шкалы делает возможным применять методы автоматизации при решении задач моделирования поведения злоумышленника при компрометации ИС и комплексной оценки информационных рисков для ее активов. Общие принципы построения оценок приведены ниже.

Всякому техническому ресурсу ИС ставится в соответствие абстрактный вектор v – вектор метрик.

$$v = (AV, AC, AU, C, I, A)$$

Этот вектор состоит из шести компонент, каждая из которых характеризует определенный параметр безопасности. Значения компонент приведены в таблице.

Компоненты вектора метрик

Компонента	Значения	Смысл значений
<i>AV</i>	$L = 0,395$ $A = 0,646$ $N = 1$	Access vector: характер доступа для использования уязвимости. L (Local) – локально на целевой системе; A (Adjacent network) – изнутри сетевой зоны, в которой расположена целевая система; N (Network) – из любой общающейся сети. Чем «дальше» злоумышленник может находиться для совершения атаки, тем выше степень уязвимости
<i>AC</i>	$H = 0,35$, $M = 0,61$, $L = 0,71$.	Access complexity: уровень сложности использования уязвимости при условии успешного доступа злоумышленника к целевой системе. H (High) – высокий; M (Medium) – средний; L (Low) – низкий. Чем ниже уровень сложности, тем выше степень уязвимости ресурса
<i>AU</i>	$M = 0,45$ $S = 0,56$ $N = 0,704$	Authentication: параметр, характеризующий особенности аутентификации субъекта при доступе к уязвимому ресурсу. Данный параметр не отражает степень сложности аутентификации, а определяет необходимое количество раз проведения этой процедуры. M (Multiple) – многократная аутентификация, S (Single) – единовременная аутентификация, N (None) – без аутентификации. Чем меньше необходимое число процедур аутентификации требуется при использовании ресурса, тем выше степень его уязвимости
<i>C</i>	$N = 0$ $P = 0,275$ $C = 0,66$	Confidentiality impact: параметр, определяющий степень влияния уязвимого ресурса на конфиденциальность информационного актива (защищаемой информации, сетевого сервиса и пр.). N (None) – уязвимость не влияет на конфиденциальность; P (Partial) – частичное влияние; C (Complete) – непосредственное (полное) влияние на конфиденциальность. Чем выше степень влияния ресурса на конфиденциальность информационного актива, тем более уязвимым он считается
<i>I</i>	$N = 0$ $P = 0,275$ $C = 0,66$	Integrity impact: параметр, определяющий степень влияния уязвимого ресурса на целостность информационного актива. N (None) – уязвимость не влияет на целостность; P (Partial) – частичное влияние; C (Complete) – непосредственное (полное) влияние на целостность. Чем выше степень влияния ресурса на целостность информационного актива, тем более уязвимым он считается
<i>A</i>	$N = 0$ $P = 0,275$ $C = 0,66$	Availability impact: параметр, определяющий степень влияния уязвимого ресурса на доступность информационного актива. N (None) – уязвимость не влияет на доступность; P (Partial) – частичное влияние; C (Complete) – непосредственное (полное) влияние на доступность. Чем выше степень влияния ресурса на доступность информационного актива, тем более уязвимым он считается

Из таблицы видно, что каждая компонента вектора метрик v может принимать одно из трех различных значений. Из этого следует, что все множество векторов метрик V имеет конечную мощность $|V|=3^6=729$, которая характеризует количество различных в рамках CVSS объектов ИС с точки зрения их уязвимостей [8].

Оценочная мера S уязвимости объекта ИС вычисляется из значений компонент вектора метрик v согласно формуле (2). Диапазон ее значений ограничен интервалом чисел от 0 до 10 с одной значащей цифрой в дробной части.

$$S = (0,6 \cdot \text{Impact} + 0,4 \cdot \text{Exploitability} - 1,5) \cdot f(\text{Impact}),$$

$$\text{Impact} = 10,41 \cdot (1 - (1 - C) \cdot (1 - I) \cdot (1 - A)),$$

$$\text{Exploitability} = 20 \cdot AV \cdot AC \cdot AU, \quad (2)$$

$$f(\text{Impact}) = 0, \text{ если } \text{Impact} = 0$$

$$\text{и } f(\text{Impact}) = 1,176, \text{ если } \text{Impact} > 0$$

Таким образом, уязвимость всякого объекта ИС, описанная в форме вектора метрик, может быть оценена по единой шкале независимо от ее природы и свойств. Полученная оценка позволяет судить о сте-

пени уязвимости рассматриваемого объекта ИС в рамках анализа защищенности ИС в целом [9].

Анализ проводится отдельно для каждой уязвимости, в данной статье рассматривается уязвимость переполнения буфера сервера. По таблице вычисляются шесть основных характеристик, результаты приведены ниже:

1. Access vector: характер доступа для использования уязвимости (AV) – N (Network) – из любой общающейся сети. $N = 1$.

2. Access complexity: уровень сложности использования уязвимости при условии успешного доступа злоумышленника к целевой системе (AC) – H (High) – высокий. $H = 0,35$.

3. Authentication: параметр, характеризующий особенности аутентификации субъекта при доступе к уязвимому ресурсу. Данный параметр не отражает степень сложности аутентификации, а определяет необходимое количество раз проведения этой процедуры (AU) – S (Single) – единовременная аутентификация. $S = 0,56$.

4. Confidentiality impact: параметр, определяющий степень влияния уязвимого ресурса на конфиденциальность информационного актива (защищаемой ин-

формации, сетевого сервиса и пр.) (C) – N (None) – уязвимость не влияет на конфиденциальность. $N = 0$.

5. Integrity impact: параметр, определяющий степень влияния уязвимого ресурса на целостность информационного актива (I) – C (Complete) – непосредственное (полное) влияние на целостность. $C = 0,66$.

6. Availability impact: параметр, определяющий степень влияния уязвимого ресурса на доступность информационного актива. C (Complete) – непосредственное (полное) влияние на доступность. $C = 0,66$.

Для компонент вектора были получены следующие результаты: $AV = 1$; $AC = 0,35$; $AU = 0,56$; $C = 0$; $I = 0,66$; $A = 0,66$. Используя эти значения, произведем дальнейшие вычисления по формуле (2):

$$\text{Impact} = 10,41 \cdot (1 - (1 - C) \cdot (1 - I) \cdot (1 - A)) = 10,41 \cdot (1 - (1 - 0) \cdot (1 - 0,66) \cdot (1 - 0,66)) = 9,207,$$

$$\begin{aligned} \text{Exploitability} &= 20 \cdot AV \cdot AC \cdot AU = \\ &= 20 \cdot 1 \cdot 0,35 \cdot 0,56 = 3,92, \end{aligned}$$

$$f(\text{Impact}) = 1,176, \text{ так как } \text{Impact} > 0$$

$$\begin{aligned} S &= (0,6 \cdot \text{Impact} + 0,4 \cdot \text{Exploitability} - 1,5) \cdot f(\text{Impact}) = \\ &= 6,576, \end{aligned}$$

Попытаемся улучшить данный алгоритм с помощью введения многократной аутентификации. Из всех компонент вектора при этом изменится только параметр $AU = 0,45$. Показатели Impact и $f(\text{Impact})$ останутся прежними, $\text{Impact} = 9,207$, $f(\text{Impact}) = 1,176$. По формуле (2) вычислим остальные показатели:

$$\begin{aligned} \text{Exploitability} &= 20 \cdot AV \cdot AC \cdot AU = \\ &= 20 \cdot 1 \cdot 0,35 \cdot 0,45 = 3,15, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= (0,6 \cdot \text{Impact} + 0,4 \cdot \text{Exploitability} - 1,5) \cdot f(\text{Impact}) = \\ &= 6,214, \end{aligned}$$

Также улучшить защищенность можно с помощью изменения параметра AV – для этого сервер и клиенты должны располагаться в одной локальной сети, $AV = 0,646$. Оставим неизменной однократную аутентификацию и произведем вычисления по формуле (2):

$$\text{Impact} = 9,207,$$

$$\begin{aligned} \text{Exploitability} &= 20 \cdot AV \cdot AC \cdot AU = \\ &= 20 \cdot 0,646 \cdot 0,35 \cdot 0,56 = 2,532, \end{aligned}$$

$$f(\text{Impact}) = 1,176, \text{ так как } \text{Impact} > 0$$

$$\begin{aligned} S &= (0,6 \cdot \text{Impact} + 0,4 \cdot \text{Exploitability} - 1,5) \cdot f(\text{Impact}) = \\ &= 5,923. \end{aligned}$$

Итак, рассмотрена оценка уязвимости переполнения буфера ПАК «Метка привилегий» по системе CVSS. При неизменном алгоритме для этой уязвимости $S = 6,576$ по шкале от 0 до 10. Этот показатель является относительным и рассматривается в сравнении. Анализ таблицы показал, что S можно улучшить

двумя способами: введением многократной аутентификации ($S = 6,214$) и применением алгоритма для локальной сети ($S = 5,923$). Смысл параметра S сводится к следующему: чем ниже числовое значение параметра, тем больше система защищена от рассматриваемой уязвимости. По результатам проведенных вычислений можно сказать, что ПАК «Метка привилегий» по возможности лучше применять в локальной сети, в остальных случаях повышение защищенности от переполнения буфера достигается введением модификации – многократного проведения аутентификации клиентов. Ведется работа по анализу других уязвимостей и доработке ПАК в соответствии с полученными результатами.

Библиографические ссылки

1. Синепол В. С., Цикин И. А. Системы компьютерной видеоконференцсвязи. Серия изданий «Связь и бизнес», М.: ООО «Мобильные телекоммуникации», 1999.
2. Организация защищенного канала передачи информации // Программные продукты и системы. 2012. № 3. С. 142–147.
3. Протокол TCP: перевод RFC: 793 [Электронный ресурс]. URL: <http://citforum.ru/internet/tifamily/tcpspec.shtml> (date of visit: 08.03.2013).
4. Cox I. J., Kilian J., Leighton T., Shamoon T. G. Secure spread spectrum watermarking for images, audio and video // Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing. 1996. P. 243–246.
5. MPEG-2 Generic coding of moving pictures and associated audio information [Электронный ресурс]. URL: <http://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-2/mpeg-2.htm> (date of visit: 08.03.2013).
6. MPEG-2 Overview [Электронный ресурс]. URL: <http://www.erg.abdn.ac.uk/future-net/digital-video/mpeg2.html> (date of visit: 08.03.2013).
7. Шудрова К. Е., Томлина А. И. Проблемы информационной безопасности при организации видеоконференций // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. В 2 т. СибГАУ. Красноярск, 2012. Т. 2. С. 693–694.
8. Лебедев Р. В. Исследование системы оценок уязвимостей объектов информационных систем // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. СибГАУ. Красноярск, 2012.
9. Лебедев Р. В. Методика формирования исходных данных для моделирования сетевых атак // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: материалы XVI Всерос. науч.-практ. конф. В 2 т. СибГАУ. Красноярск, 2012. Т. 2. С. 663–665.

© Шудрова К. Е., Лебедев Р. В.,
Почкаенко В. Ю., 2013

РАЗДЕЛ
2

АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ
ТЕХНИКА

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ФОРМЫ РАДИООТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ТРАНСФОРМИРУЕМОГО РЕФЛЕКТОРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Н. Н. Голдобин

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: manonthemoonmusic@gmail.com

Предложена методика оценки формы радиоотражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата, позволяющая определить основные геометрические характеристики рефлектора, такие как отклонение фокальной точки и фокальной оси, изменение фокусного расстояния параболоида наилучшего соответствия для деформированной поверхности рефлектора, а также среднеквадратическое отклонение точек, описывающих поверхность рефлектора.

Ключевые слова: космический аппарат, радиоотражающая поверхность, рефлектор, параболоид.

ESTIMATION OF THE FORM OF A LARGE-SIZED TRANSFORMED REFLECTOR SURFACE FOR A SPACECRAFT

N. N. Goldobin

JSC "Academician M. F. Reshetnev" Information Satellite Systems"
52, Lenin street, Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: manonthemoonmusic@gmail.com

This article offers a methodology of estimation of a spacecraft large-sized transformable reflector surface form, which allows to define the basic geometrical characteristics of the reflector, such as the focal point deflection and the focal axis deflection, zoom effect of paraboloid of the best fit for a deformable reflector surface, as well as the mean-squared deviation of the points which circumscribe the reflector surface.

Keywords: spacecraft, reflector surface, paraboloid.

Методика исследования поведения радиоотражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора, находящегося под влиянием различных факторов космического пространства, включает в себя следующие этапы:

- определение отклонения поверхности рефлектора в пространстве от заданного положения;
- определение среднеквадратического отклонения поверхности от параболоида наилучшего соответствия.

Параболоид наилучшего соответствия (ПНС) – виртуальный параболоид с заданным значением фокусного расстояния, полученный в результате проведения нелинейного регрессионного анализа по методу наименьших квадратов применительно к массиву точек, описывающих радиоотражающую поверхность данного рефлектора. «Вписать» параболоид в радиоотражающую поверхность рефлектора – значит найти ПНС.

Задача «вписывания» ПНС в набор точек отражающей поверхности рефлектора, полученных в ходе проведения измерений, носит нелинейный характер и требует для решения применения численных методов оптимизации.

Анализ известных методов решения подобных задач, основанных на применении градиентных (метод градиентного спуска, метод Коши, метод Ньютона, метод Левенберга-Марквардта и др.), геометрических (метод поясов, метод касательных плоскостей), сто-

хастических (метод Монте-Карло) и других подходов [1–3], автором статьи был выполнен, однако, к настоящему времени положительный результат получен лишь в случае применения алгоритма Левенберга-Марквардта.

Прежде чем перейти к рассмотрению алгоритма Левенберга-Марквардта, зададим функцию оптимизации, которая описывается уравнением параболоида, произвольно расположенного в пространстве.

Радиоотражающая поверхность рефлектора представляет собой круговую вырезку из параболоида вращения, смещенную вдоль оси Y , и описывается набором из N точек (рис. 1):

$$\{(X_i, Y_i, Z_i)\}_{i=1}^N, \quad (1)$$

где X, Y, Z – координаты в канонической системе координат исходного параболоида.

Для каждой поверхности второго порядка существует декартова прямоугольная система координат, в которой эта поверхность имеет каноническое уравнение. Всего имеется 17 типов поверхностей второго порядка. Каждый тип характеризуется своим набором инвариантов и своей формой канонического уравнения – простейшей формой, к которой можно привести уравнение поверхности с помощью выбора декартовой прямоугольной системы координат. Соответ-

вующие базис и система координат также называются каноническими [4].

Приведем уравнение поверхности второго порядка в общем виде [5]:

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{23}yz + 2a_{31}zx + 2a_{14}x + 2a_{24}y + 2a_{34}z + a_{44} = 0, \quad (2)$$

где $a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_{12}, a_{23}, a_{31}, a_{14}, a_{24}, a_{34}, a_{44}$ – коэффициенты полинома.

Представим это уравнение в матричной форме:

$$\xi^T A \xi + 2a\xi + k = 0, \quad (3)$$

где

$$\xi = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix},$$

$$a = [a_{14} \quad a_{24} \quad a_{34}], \quad k = a_{44}. \quad (4)$$

Известно каноническое уравнение эллиптического параболоида [4]:

$$\frac{\vartheta^2}{\alpha^2} + \frac{\eta^2}{\beta^2} = 2\zeta. \quad (5)$$

где ϑ, η, ζ – неизвестные параметры уравнения; α, β – коэффициенты уравнения.

Для параболоида вращения это уравнение имеет вид

$$\frac{\vartheta^2 + \eta^2}{\alpha^2} = 2\zeta, \quad (6)$$

где $\alpha = \beta$.

В выбранной системе координат уравнение (6) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{Y^2 + Z^2}{\alpha^2} = 2X \quad \text{или} \quad \frac{Y^2 + Z^2}{4F} = X, \quad (7)$$

где $F = \frac{a^2}{2}$ – фокусное расстояние.

Далее необходимо перейти от частного случая – канонического уравнения параболоида вращения (7), к общему случаю – уравнению поверхности второго порядка. Для этого представим уравнение (7) в матричном виде, и A, a и k , соответственно, будут равны:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4F} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4F} \end{bmatrix}, \quad a = [-1 \quad 0 \quad 0], \quad k = 0. \quad (8)$$

Пусть в общем случае рассматриваемый параболоид имеет линейные и угловые отклонения от канонической формы. Запишем уравнение такого параболоида в канонической системе координат, используя матрицу перехода R . Конечное уравнение является уравнением поверхности второго порядка, произвольно ориентированной в пространстве, и имеет вид

$$\xi'^T A' \xi' + 2a' \xi' = 0, \quad (9)$$

$$\text{где} \quad \xi' = \begin{bmatrix} X - x \\ Y - y \\ Z - z \end{bmatrix}; \quad A' = R^T A R; \quad a' = a R. \quad (10)$$

Матрица перехода от старого базиса к новому в декартовой системе координат выражается с помощью комбинации трех углов, однозначно определяющих угловое отклонение нового базиса относительно старого. В качестве таких углов могут выступать углы Эйлера (угол нутации, угол прецессии, угол собственного вращения), самолетные углы (угол крена, угол рыскания, угол тангажа), углы поворота вокруг ортогональных осей. В рамках рассмотрения данной задачи удобнее всего воспользоваться матрицей перехода, являющейся матрицей поворота в трёхмерном пространстве относительно трёх координатных осей исходной системы координат. Такая матрица может быть получена, например, с использованием аппарата кватернионов [6] и имеет вид

$$R = \begin{bmatrix} \cos(RZ)\cos(RY) & \sin(RZ)\cos(RY) & -\sin(RY) \\ \cos(RZ)\sin(RY)\sin(RX) - \sin(RZ)\cos(RX) & \sin(RZ)\sin(RY)\sin(RX) + \cos(RZ)\cos(RX) & \cos(RY)\sin(RX) \\ \cos(RZ)\sin(RY)\cos(RX) + \sin(RZ)\sin(RX) & \sin(RZ)\sin(RY)\cos(RX) - \cos(RZ)\sin(RX) & \cos(RY)\cos(RX) \end{bmatrix} \quad (11)$$

где RX, RY, RZ – углы поворота вокруг осей X, Y, Z соответственно в канонической системе координат.

Перейдем к алгоритму вписывания ПНС в набор точек радиоотражающей поверхности рефлектора.

Алгоритм Левенбрга-Марквардта предназначен для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей и заключается в последовательном приближении заданных начальных значений к искомому локальному оптимуму [7].

Поскольку рассматриваемый параболоид имеет ось вращения (ось X), то во избежание получения сингулярности в процессе выполнения алгоритма зада-

дим параметру RX значение, равное нулю. Тогда матрица перехода (11) примет вид

$$R(RY, RZ) = \begin{bmatrix} \cos(RZ)\cos(RY) & \sin(RZ)\cos(RY) & -\sin(RY) \\ -\sin(RZ) & \cos(RZ) & 0 \\ \cos(RZ)\sin(RY) & \sin(RZ)\sin(RY) & \cos(RY) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Учитывая сказанное выше и уравнение (9), получаем функцию оптимизации, описывающую положение параболоида вращения в пространстве:

$$ParabFun(X, Y, Z, \omega) = \xi'^T A' \xi' + 2a'' \xi', \quad (13)$$

где $\omega = [x \ y \ z \ RY \ RZ]^T$ – вектор параметров, определяющий линейные (x, y, z) и угловые (RY, RZ) отклонения параболоида вращения от канонической формы.

В качестве критерия оптимизации используется среднеквадратическая ошибка модели на заданной выборке:

$$\sum_{i=1}^N ParabFun(X_i, Y_i, Z_i, \omega)^2 \rightarrow \min. \quad (14)$$

Для реализации алгоритма необходимо задать начальный вектор параметров ω . На каждом шаге итерации этот вектор заменяется на вектор $\omega + \Delta\omega$ [7]. Для оценки приращения $\Delta\omega$ используется приближение функции:

$$ParabFun(X, Y, Z, \omega + \Delta\omega) \approx \\ \approx ParabFun(X, Y, Z, \omega) + J(\omega) \Delta\omega, \quad (15)$$

где $J(\omega)$ – якобиан функции $ParabFun(X, Y, Z, \omega)$ в точке ω :

$$J(\omega) = \begin{bmatrix} \frac{\partial ParabFun(X_1, Y_1, Z_1, \omega)}{\partial \omega_1} & \dots & \frac{\partial ParabFun(X_1, Y_1, Z_1, \omega)}{\partial \omega_5} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial ParabFun(X_i, Y_i, Z_i, \omega)}{\partial \omega_1} & \dots & \frac{\partial ParabFun(X_i, Y_i, Z_i, \omega)}{\partial \omega_5} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Путем несложных математических преобразований получим выражение [7; 8]:

$$\Delta\omega = \left(J(\omega)^T J(\omega) \right)^{-1} J(\omega)^T (Fun(\omega)), \quad (17)$$

где

$$Fun(\omega) = \begin{bmatrix} ParabFun(X_1, Y_1, Z_1, \omega) \\ \vdots \\ ParabFun(X_i, Y_i, Z_i, \omega) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Известно, что в процессе расчета матрица $J(\omega)^T J(\omega)$ может оказаться вырожденной. Во избежание этой проблемы американским математиком Дональдом Марквардом в 1963 г. был введен параметр регуляризации $\lambda \geq 0$ [7]:

$$\Delta\omega(\omega, \lambda) = \left(J(\omega)^T J(\omega) + \lambda I \right)^{-1} J(\omega)^T (Fun(\omega)), \quad (19)$$

$$\text{где} \quad I = \text{diag} \left(J(\omega)^T J(\omega) \right). \quad (20)$$

Блок-схема реализации данного алгоритма представлена на рис. 2.

В качестве примера, демонстрирующего работоспособность данного алгоритма, в таблице приведены результаты моделирования следующей ситуации:

– радиоотражающая поверхность рефлектора имеет линейные и угловые отклонения от заданного положения: $x = 3, y = 4, z = 5; RY = 10^\circ, RZ = 20^\circ$;

– смоделированы искажения формы поверхности вдоль соответствующих осей с использованием генератора случайных чисел: $rnd_x = rnd(10^{-4}), rnd_y = rnd(10^{-4}), rnd_z = rnd(10^{-4})$.

В результате расчета, за 14-ти итераций были получены следующие величины отклонения ПНС от канонического вида:

$$x = 3,0000561311,$$

$$y = 3,9999926509, z = 5,0000089952,$$

$$RY = 9,9999253282^\circ, RZ = 20,0001102286^\circ$$

при заданной точности расчета $\varepsilon = 10^{-10}$.

Данный алгоритм был успешно протестирован на функции Розенброка путем нахождения локального минимума, что подтверждает его работоспособность. Результаты применения алгоритма приведены ниже:

– функция Розенброка: $RosenbrockFun(x, y) = (1-x)^2 + 100(y-x^2)^2$;

– начальное приближение: $x_0 = 0, y_0 = 0$;

– начальное значение параметра регуляризации: $\lambda^{<0>} = 10^4$;

– критерий останова: $RosenbrockFun(x, y) < 10^{-10}$;

– полученные значения переменных: $x = 0,99999, y = 0,99998$;

– теоретические значения переменных: $x = 1, y = 1$.

Следует отметить, что достигнутый результат был получен после 14 107 итераций (4,5 минуты машинного времени на рабочей станции средней вычислительной мощности). Есть сведения [8], что ответ может быть получен гораздо меньшим количеством итераций. Среди возможных причин продолжительности времени счета могут выступать:

– выбор начального приближения;

– выбор точности сходимости (критерий останова);

– выбор оптимального значения параметра регуляризации $\lambda^{<k>}$ на каждой итерации.

Результаты расчетов подтверждают, что применение алгоритма Левенберга–Марквардта позволяет вписать ПНС в деформированную радиоотражающую поверхность рефлектора с заданной точностью, определив его ориентацию в пространстве относительно канонической системы координат, что впоследствии даст возможность определить СКО смещенных точек радиоотражающей поверхности от ПНС и от теоретического профиля.

Вторым этапом исследования формы радиоотражающей поверхности рефлектора является определение среднеквадратического отклонения поверхности рефлектора от параболоида вращения, заданного в канонической системе координат. Процесс решения данной задачи складывается из трех шагов:

– задание функции оптимизации;

– определение расстояний от точек, описывающих радиоотражающую поверхность рефлектора, до канонического параболоида вращения с использованием метода Ньютона;

– определение СКО поверхности рефлектора от заданного канонического параболоида.

В качестве исходных данных для проведения расчета выступают координаты набора точек, описывающих радиотражающую поверхность рефлектора, представленные системе координат, где параболоид, относительно которого будет определяться СКО, имеет канонический вид. Возможны несколько случаев расчета СКО: определение СКО от ПНС, определение СКО от теоретического параболоида.

Случай определения СКО от ПНС предполагает использование координат точек деформированной поверхности рефлектора с учетом компенсации ли-

нейных и угловых отклонений, полученных в результате нахождения ПНС для этого набора точек.

В случае определения СКО от теоретического параболоида в рабочий алгоритм подставляются координаты точек, описывающих отражающую поверхность рефлектора, напрямую, т. е. без проведения дополнительных преобразований.

Как правило, чаще на практике используется случай определения СКО от ПНС, который будет рассмотрен далее подробно.

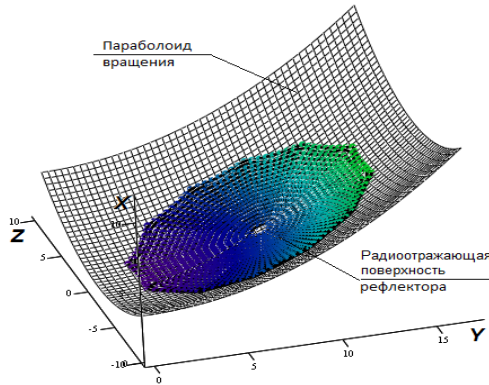


Рис. 1. Вписанный в реперные точки радиотражающей поверхности рефлектора параболоид вращения (ПНС)

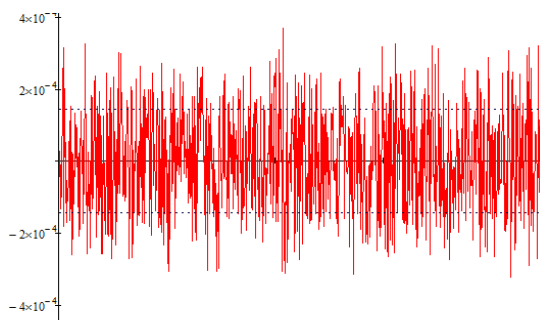


Рис. 3. Распределение отклонений от теоретического профиля по точкам радиотражающей поверхности рефлектора

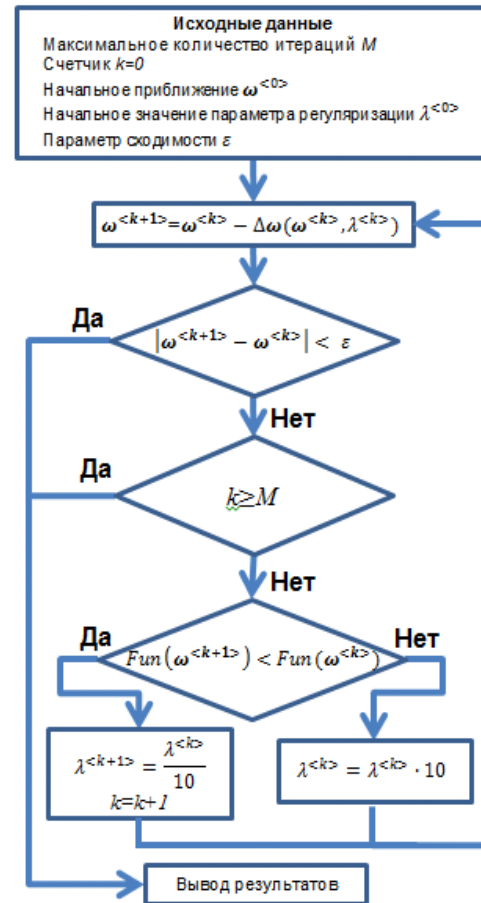


Рис. 2. Блок-схема рабочего алгоритма

Результаты расчета вписывания ПНС с помощью алгоритма Левенберга–Марквардта

k -я итерация	λ	x	y	z	RY	RZ	$Fun(\omega^{<k+1>})$	$Fun(\omega^{<k>})$
1	1000	-0,0011948599	0,0014909484	0,0016262894	-0,0039098024	0,0037986940	210,1201250291	210,2041774599
2	100	-0,0071316546	0,0089152978	0,0097182097	-0,0233551297	0,0227057286	209,2839837966	210,1201250291
3	10	-0,0631473571	0,0803475632	0,0869840736	-0,2083777991	0,2039239828	201,3402218070	209,2839837966
4	1	-0,4079149817	0,5990569327	0,6055749061	-1,4196475550	1,4831749255	149,7480658534	201,3402218070
5	0,1	-0,6655363669	2,0997851510	1,0955996394	-2,5789538423	4,8664240291	73,9721366423	149,7480658534
6	0,01	1,2003978712	4,7815954855	-0,6217419735	-0,2597276959	10,6774127514	35,0186490258	73,9721366423
7	0,001	2,4299822353	6,5642800231	-0,2966812952	-0,3672016584	13,0652873162	8,1905419796	35,0186490258

k -я итерация	λ	x	y	z	RY	RZ	$Fun(\omega^{<k+1>})$	$Fun(\omega^{<k>})$
8	0,0001	2,7665056851	6,0522450480	1,9462555051	3,4186857875	14,9695405943	3,0576611878	8,1905419796
9	0,001	2,7665056851	6,0522450480	1,9462555051	3,4186857875	14,9695405943	3,0576611878	8,1905419796
10	0,0001	2,9235534072	5,3501917036	3,2264147489	6,1329317250	16,7740172665	1,7807514319	3,0576611878
11	0,00001	2,9661126934	4,2576111844	4,7644432566	9,4065361217	19,4122164073	1,6942318899	1,7807514319
12	0,000001	2,9984389607	4,0043735927	4,9975052637	9,9921857507	19,9898713652	0,0594100189	1,6942318899
13	1E-07	3,0000558761	3,9999977494	5,0000041911	9,9999140937	20,0000982549	0,0010684539	0,0594100189
14	1E-08	3,0000561311	3,9999926509	5,0000089952	9,9999253282	20,0001102286	0,0010683699	0,0010684539

Прежде чем перейти к рассмотрению метода Ньютона применительно к рассматриваемой задаче, зададим функцию оптимизации, которая должна описываться выражением, определяющим наикратчайшее расстояние от точки до поверхности параболоида.

Наикратчайшее расстояние от точки до поверхности – длина отрезка, лежащего на перпендикуляре, восстановленном из данной точки на касательную плоскость данной поверхности. Нахождение этой величины является оптимизационной задачей.

Как известно, расстояние от точки $P(x_0; y_0; z_0)$ до плоскости

$$Plane = Ax + By + Cz + D \quad (21)$$

определяется по выражению

$$\delta = \frac{Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (22)$$

Уравнение касательной плоскости имеет вид

$$\frac{\partial F}{\partial x}(X - x) + \frac{\partial F}{\partial y}(Y - y) + \frac{\partial F}{\partial z}(Z - z) = 0. \quad (23)$$

Из выражений (22) и (23) следует, что уравнение касательной плоскости для точки, лежащей на поверхности параболоида будет иметь вид

$$(-1)(X - x) + \frac{Y}{2F}(Y - y) + \frac{Z}{2F}(Z - z) = 0. \quad (24)$$

Тогда формулу для определения расстояния от точки, принадлежащей радиоотражающей поверхности рефлектора, до касательной плоскости, проходящей через точку P_{parab} , лежащую на поверхности теоретического параболоида, можно записать как

$$\delta = \frac{(-1)(X - x) + \frac{Y}{2F}(Y - y) + \frac{Z}{2F}(Z - z)}{\sqrt{(-1)^2 + \left(\frac{Y}{2F}\right)^2 + \left(\frac{Z}{2F}\right)^2}}, \quad (25)$$

где $x = \frac{y^2 + z^2}{4F}$; точка $P_{parab}(x, y, z)$ принадлежит параболоиду.

Аналогично действиям, применимым к алгоритму Левенберга–Марквардта, и на основании выражения (25) зададим функцию оптимизации для решения за-

дачи поиска минимума расстояния от точки на поверхности рефлектора до рассматриваемого параболоида по методу Ньютона:

$$DistFun(y, z, X, Y, Z) = \delta. \quad (26)$$

Метод Ньютона – итерационный численный метод нахождения корня заданной функции [8]. Алгоритм нахождения численного решения уравнения $DistFun(y, z, X, Y, Z) = 0$ сводится к итерационной процедуре вычисления:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} y_{k+1,i} \\ z_{k+1,i} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} y_{k,i} \\ z_{k,i} \end{bmatrix} - \\ & - \left(\nabla^2 DistFun(y_{k,i}, z_{k,i}, X_i, Y_i, Z_i) \right)^{-1} \times \\ & \times \nabla DistFun(y_{k,i}, z_{k,i}, X_i, Y_i, Z_i), \end{aligned} \quad (27)$$

где i – номер рассматриваемой точки на поверхности рефлектора; k – номер итерации.

Критерий останова при выполнении алгоритма:

$$\begin{aligned} & DistFun(y_{k,i}, z_{k,i}, X_i, Y_i, Z_i) - \\ & - DistFun(y_{k+1,i}, z_{k+1,i}, X_i, Y_i, Z_i) < \varepsilon, \end{aligned} \quad (28)$$

где ε – точность сходимости.

Значения отклонений точек от рассматриваемого параболоида представлены на рис. 3, где ось абсцисс – номер точки радиоотражающей поверхности рефлектора, ось ординат – величины отклонений каждой точки от рассматриваемого параболоида.

Среднеквадратическое отклонение точек на радиоотражающей поверхности рефлектора от теоретического профиля рассчитывается по выражению

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\delta(y_{k+1,i}, z_{k+1,i}, X_i, Y_i, Z_i) \right)^2}{N}}. \quad (29)$$

Использование метода Ньютона позволяет определить среднеквадратическое отклонение точек радиоотражающей поверхности рефлектора от параболоида наилучшего соответствия, а также от теоретического параболоида.

Разработанный алгоритм с использованием метода Ньютона применим для рефлекторов с любой возможной степенью искажения радиоотражающей поверхности.

Таким образом, разработанная методика, включающая в себя определение параболоида наилучшего соответствия и СКО поверхности рефлектора, позволяет определить основные геометрические характеристики данного рефлектора. Методика может быть использована при обработке результатов опытных и натурных исследований. В настоящее время ведется работа по созданию методики управления формой радиоотражающей поверхности рефлектора в процессе его эксплуатации на орбите.

Библиографические ссылки

1. Marston A. J. Geometric Optimization of Solar Concentrating Collectors using Quasi-Monte Carlo Simulation – Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
2. Min Dai, Timothy S. Newman, Chunguang Cao. Least-squares-based fitting of paraboloids. / Department of Computer Science, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, AL 35899, USA. Pattern Recognition, 2006.
3. Sung Joon Ahn. Geometric Fitting of Parametric Curves and Surfaces. Journal of Information Processing Systems. 2008. Vol. 4. № 4. December.
4. Беклемишев Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры : учеб. для вузов. 10-е изд., испр. М. : Физматлит, 2005.
5. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М. : Наука, 1981.
6. Голдобин Н. Н. Применение теории кватернионов при обработке результатов расчета температурных деформаций рефлектора // Молодежь, техника, космос : сб. работ IV Общерос. молодеж. науч.-тех. конф. СПб. : Военмех, 2012. С. 45–48.
7. Marquardt D. An algorithm for Least-Squares Estimation of the Nonlinear Parameters. SIAM Journal on Applied Mathematics. 1963. 11 (2). С. 431–441.
8. Математический синтез оптических наноструктур : учеб. пособие / К. П. Ловецкий, Л. А. Севастьянов, О. Н. Бикеев, М. В. Паукишто. М. : РУДН, 2008.

© Голдобин Н. Н., 2013

УДК 621.31:629.78

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЛЕРА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

В. И. Иванчура, Ю. В. Краснобаев, А. В. Чубарь, С. С. Пост

Сибирский федеральный университет
Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: ivan43ura@yandex.ru

Рассмотрена энергетическая модель контроллера солнечной батареи, методика моделирования и исследования энергетических процессов в системах электропитания, разработанная с помощью системы проектирования MatLab 7.9.

Ключевые слова: контроллер солнечной батареи, аккумуляторная батарея, система электропитания, энергетическая модель.

AN ENERGY MODEL OF A SOLAR CELL BATTERY CONTROLLER

V. I. Ivanchura, Yu. V. Krasnobaev, A. V. Chubar, S. S. Post

Siberian Federal University
26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: ivan43ura@yandex.ru

An energy model of a solar cell battery controller is considered in the article. Procedures of simulation and researches of energy processes in the systems of power supply are developed with the help of MatLab 7.9.

Keywords: solar cell battery controller, storage battery, power system, energetic model.

Автономные системы электропитания на основе солнечных батарей (СБ) находят все более широкое применение. Это связано, во-первых, с тем, что в последние десятилетия значительно расширился спектр электротехнических устройств и приборов, применяемых в различных областях деятельности человека, использующих энергию СБ, и, во-вторых, со значительным снижением их стоимости. В состав таких систем, помимо СБ, входит аккумуляторная батарея (АБ), кабельная сеть, коммутатор нагрузки и кон-

троллер солнечной батареи. Несмотря на то, что перечисленные выше элементы применяются достаточно давно, изучение особенностей их функционирования и разработка математических моделей остаются актуальными и сегодня [1].

Постановка задачи. При проектировании и эксплуатации автономных систем электропитания (СЭП) на основе солнечных батарей необходимо:

–обеспечить энергобаланс в СЭП при известных энергетических характеристиках основных и буфер-

ных источников энергии и временной диаграмме энергопотребления со стороны нагрузки;

– оценить влияние деградационных изменений энергетических характеристик основных и буферных источников на работу СЭП;

– выбрать солнечные и аккумуляторные батареи исходя из условия обеспечения энергобаланса.

– разработать и реализовать алгоритмы управления и обеспечения заданных режимов элементов СЭП.

Для решения указанных проблем целесообразно использовать методы компьютерного имитационного моделирования.

Для разработки математической модели системы необходимы модели составляющих её элементов. С разработанной моделью солнечной батареи можно ознакомиться в [2], а в качестве моделей аккумуляторных батарей используются модели батарей, входящих в состав библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab 7.9 [3]. Модель контроллера солнечной батареи рассматривается в настоящей статье. Логика функционирования модели контроллера должна учитывать:

– работу контроллера в режиме экстремального регулирования мощности СБ при дефиците мощности СБ;

– заряд АБ постоянным током ограничения задаваемой величины (I_3) при избытке мощности СБ;

– заряд АБ снижающимся током при достижении напряжения АБ задаваемого уровня

($U_{аб_max}$) в условиях избытка мощности СБ;

– прерывание процесса заряда АБ при снижении напряжения СБ ниже уровня напряжения АБ;

– учёт изменения КПД силовой цепи контроллера в зависимости от напряжений на СБ и АБ, а также мощности, потребляемой от СБ.

Решение задачи. Для решения поставленной задачи используется среда визуального моделирования Simulink, входящая в состав пакета MATLAB 7.9. Одним из главных его достоинств является возможность моделирования, сочетающего методы структурного и имитационного моделирования. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет существенно упростить модель, а, следовательно, повысить её устойчивость и скорость работы.

Модель контроллера солнечной батареи. Блок SOLAR_CONTROLLER представлен на рис. 1, а. На его входы поступают сигналы U_{N_SB} – напряжение с выхода модели солнечной батареи, используемое экстремальным регулятором мощности, и U_{AB} – напряжение аккумуляторной батареи, используемое преобразователем тока АБ.

Основными элементами блока SOLAR_CONTROLLER являются экстремальный регулятор мощности СБ и конвертер тока заряда АБ. Модель экстремального регулятора мощности СБ описана в [2]. Модель конвертера тока АБ [4], которая выполняет описанные выше функции, за исключением функции экстремального регулирования мощности представлена на рис. 1, б.

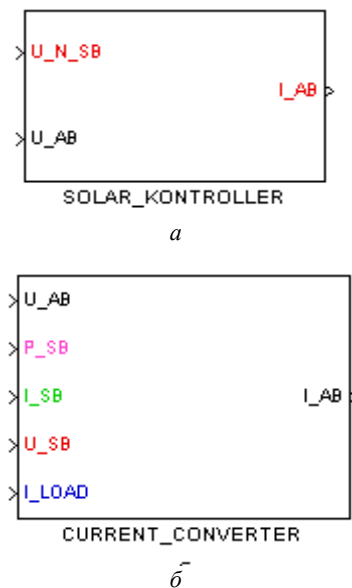


Рис. 1. Структура модели контроллера СБ
а – блок SOLAR_CONTROLLER; б – блок CURRENT_CONVERTER

На величину тока заряда АБ влияют следующие параметры: напряжение на выходе АБ ($U_{аб}$), мощность солнечной батареи ($P_{сб}$), ток солнечной батареи ($I_{сб}$), напряжение солнечной батареи ($U_{сб}$) и ток нагрузки модели контроллера (I_n).

Важнейшей составляющей подсистемы CURRENT_CONVERTER является блок PR_L, реализованный с помощью блока S-Function Builder2 на языке C++ [5; 6].

Рассмотрим принцип работы Блока S-FunctionBuilder2 (рис. 2). На входы блока поступают 8 сигналов.

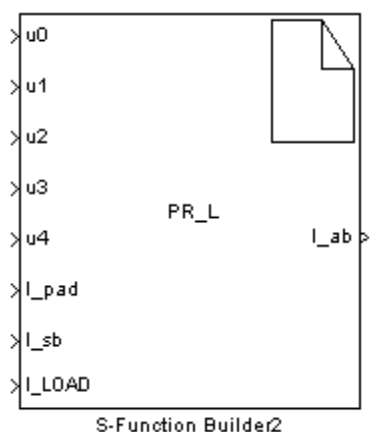


Рис. 2. Блок S-FunctionBuilder2

Логика функционирования модели определяется сигналами $u0 \div u4$. На эти входы поступают сигналы, являющиеся результатами сравнения величин $U_{аб}$, $P_{сб}$, $I_{сб}$, $U_{сб}$, I_n с соответствующими уставками, и,

в зависимости от результатов сравнения, модель функционирует в одном из следующих пяти режимов:

- если напряжение на выходе АБ меньше максимально возможного напряжения АБ и мощность, генерируемая солнечной батареей, меньше суммарной мощности аккумуляторной батареи и нагрузки, на вход u_0 подается сигнал «1» (на входы u_1 , u_2 , u_3 и u_4 подается «0»), и система работает в режиме экстремального регулирования;

- если напряжение на выходе АБ меньше максимально возможного напряжения АБ, и мощность, генерируемая солнечной батареей, больше суммарной мощности аккумуляторной батареи и нагрузки, на вход u_1 подается сигнал «1» (на входы u_1 , u_2 , u_3 и u_4 подается «0»), и контроллер заряжает АБ постоянным задаваемым током;

- если напряжение на выходе АБ равняется максимально возможному напряжению АБ и мощность, генерируемая солнечной батареей, больше суммарной мощности аккумуляторной батареи и нагрузки, на вход u_2 подается сигнал «1» (на входы u_1 , u_2 , u_3 , u_4 подается «0»), и контроллер заряжает АБ снижающимся током;

- если мощность, потребляемая нагрузкой, превышает мощность СБ, то на вход u_4 подается сигнал «1» (на входы u_0 , u_1 , u_2 и u_3 подается «0»), и модель работает в режиме разряда АБ;

- во всех остальных случаях системы сигнал «1» подается на вход u_3 (на входы u_0 , u_1 , u_2 и u_4 подается «0»), и заряда АБ не происходит.

Исходный код программы блока S-FunctionBuilder2 с комментариями:

```
if (u0[0] == 1) // если выполняется условие  $u_0 \rightarrow$  контроллер
работает в режиме экстремального регулирования
I_ab[0] = I_sb[0] - I_nagruzki_modeli[0]; // и ток заряда АБ
равен разнице тока солнечной батареи и тока нагрузки
else
if (u1[0] == 1) // если выполняется условие  $u_1 \rightarrow$  контроллер
заряжает АБ постоянным током
I_ab[0] = 4; // величина постоянного задаваемого тока = 4 А
else
if (u2[0] == 1) // если выполняется условие  $u_2 \rightarrow$  напряжение
АБ достигло своего максимального значения
I_ab[0] = I_pad[0]; // и контроллер заряжает АБ падающим
током
else
if (u3[0] == 1) // если выполняется условие  $u_3 \rightarrow$  система не
заряжает АБ
I_ab[0] = 0; // ток АБ = 0
if (u4[0] == 1) // если выполняется условие  $u_4 \rightarrow$  АБ работа-
ет в режиме разряда
I_ab[0] = I_sb[0] - I_nagruzki_modeli[0]; // величина тока раз-
ряда определяется мощностью нагрузки.
```

Тестирование модели контроллера тока заряда АБ. Для проверки правильности функционирования модели контроллера солнечной батареи в соответствии с оговоренными в постановке задач алгоритмами проведено тестирование модели контроллера СБ. Логика функционирования модели описана выше.

На рис. 3 приведены временные диаграммы, поясняющие работу модели контроллера солнечной батареи при максимальной мощности СБ 120 Вт, максимально допустимом напряжении АБ 14 В и ограничением на зарядный ток 4 А.

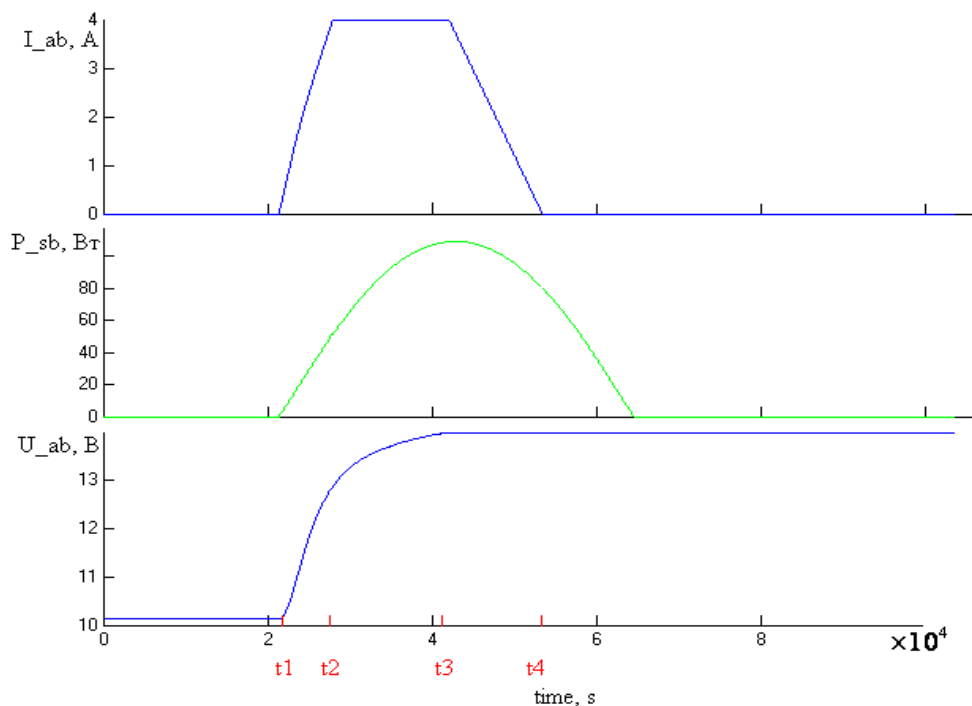


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие работу модели

На временных диаграммах I_{ab} , P_{sb} и U_{ab} показаны ток АБ, мощность СБ и напряжение на выходе

АБ соответственно. На временных диаграммах видно, что на интервале времени $[0; t_1]$ мощность СБ равна

нулю. Ток АБ также равен нулю, и заряда АБ не происходит. Начиная с момента времени t_1 СБ начинает генерировать мощность. С ростом мощности СБ растет ток заряда АБ. На интервале времени $[t_1 \div t_2]$ система работает в режиме экстремального регулирования. В момент времени t_2 ток заряда АБ достигает задаваемого уровня ограничения, поэтому на интервале $[t_2 \div t_3]$ контроллер заряжает АБ постоянным током. В момент времени t_3 напряжение АБ достигает максимально допустимой величины, поэтому на интервале $[t_3 \div t_4]$ контроллер заряжает АБ падающим током. К моменту времени t_4 ток АБ становится равным нулю, следовательно, заряд АБ прекращается.

Поскольку в данной модели нагрузка отсутствует, и, следовательно, ток нагрузки равен нулю, в тестировании не рассмотрен режим разряда АБ.

Таким образом, убеждаемся, что модель функционирует в соответствии с алгоритмами, оговоренными в постановке задачи.

Разработана модель контроллера солнечной батареи с использованием функциональных блоков в программном пакете автоматизированного проектирования MATLAB 7.9. Она обеспечивает возможность задавать ток заряда аккумуляторной батареи в трех режимах работы: экстремального регулирования, заряда аккумуляторной батареи постоянным током и заряда аккумуляторной батареи падающим током, что подтверждают результаты тестирования.

Эта модель контроллера может быть использована в составе моделей систем электропитания для решения задач, связанных с обеспечением энергобаланса и отработки алгоритмов управления в таких системах.

Библиографические ссылки

1. Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов / М. В. Лукьяненко и др. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008.
2. Иванчура В. И., Чубарь А. В., Пост С. С. Энергетические модели элементов автономных систем электропитания // Научный журнал СФУ. Секция «Техника и технология». 2012. Т. 5. № 2. С. 179–190.
3. Implementgenericbatterymodel [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/battery.html>.
4. Пост С. С., Краснобаев Ю. В., Чубарь А. В. Разработка и исследование энергетических моделей импульсных стабилизаторов напряжения // Вестник СибГАУ. 2012. № 1 (41). С. 48–52.
5. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Simulink и SimPower Systems. М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008.
6. Культин Н. Б. С++ в задачах и примерах. СПб. : БХВ-Петербург, 2006.

© Иванчура В. И., Краснобаев Ю. В., Чубарь А. В., Пост С. С., 2013

УДК 669.713.7

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ» КОНСТРУКЦИЙ ФОРМО- И РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. Н. Лихачев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1. E-mail: alikhachev@yandex.ru

Представлены методологические аспекты, лежащие в основе создания «интеллектуальных» конструкций (ИК) на основе диэлектрических полимерных материалов, применяемых в системах космических аппаратов для обеспечения их формо- и размеростабильности. Рассматриваются вопросы математического моделирования таких систем, а также подходы, связанные с экспериментальными исследованиями таких систем. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований таких материалов и систем, позволяющих осуществлять проектировочный анализ таких систем

Ключевые слова: «интеллектуальная» конструкция, эластичные диэлектрические материалы.

FEATURE OF DEVELOPMENT OF “INTELLIGENT” CONSTRUCTIONS OF SHAPE- AND DIMENSION-STABLE STRUCTURES OF SPACE VEHICLES FROM DIELECTRIC POLYMER MATERIALS

A. N. Likhachev

Baltic State Technical University “VOENMEKh” named after D. F. Ustinov
1 1-ya Krasnoarmeyskaya street, Saint-Petersburg, Russia, 190005. E-mail: alikhachev@yandex.ru

The paper presents methodology aspects which are the basis for development and design of “intelligent” shape- and dimension- stable structures of space vehicles, made from dielectric polymer materials. Problems of mathematical simulation

of such systems are considered, along with approaches connected to experimental investigations of such materials and systems. Methodology of design of "intelligent" structures made from dielectric polymer materials is developed.

Keywords: "intelligent" structures, elastic dielectric materials.

Современный этап развития космической техники характерен созданием космических аппаратов (КА) и систем, обладающих уникальными функциональными свойствами и работающих, как правило, в экстремальных условиях внешней среды. Устойчивая тенденция к увеличению габаритных размеров, массы и энергооборуженности, наряду с увеличением сроков активного существования КА и высочайшими требованиями, выдвигаемыми к функциональным характеристикам таких объектов, приводит к системным противоречиям, которые сложно разрешить традиционными методами. Вышеупомянутые факторы приводят к необходимости управления характеристиками КА, в том числе и напряженно-деформируемым состоянием (НДС) конструкции в процессе ее эксплуатации. Одним из принципиальных подходов к решению этих проблем является создание нового поколения КА основанного на новой идеологии проектирования такого рода объектов, которая лежит в русле организации управляемых «интеллектуальных» конструкций [1]. В работе рассматриваются вопросы математического и физического моделирования «интеллектуальных» конструкций КА на основе использования в качестве актуаторов и сенсоров эластичных диэлектрических материалов (ЭДМ). ЭДМ является преобразователями электрической энергии в механическую. Преобразование происходит по средствам сжатия материала кулоновскими силами в одном направлении, что приведет к удлинению в остальных направлениях. При этом возникает давление

$$p = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (U/\delta)^2, \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; U – напряжение между обкладками конденсатора; δ – толщина диэлектрика [2].

В процессе исследования для оценки деформации диэлектрического эластомера были рассмотрены несколько «гиперупругих» моделей, в рамках которых можно описать большие деформации ЭДМ, что связано со способностью этих материалов достигнуть относительных деформаций более 500 %.

В основе таких моделей лежит положение о том, что упругие свойства материала можно описать с помощью плотности энергии деформации W . В общем случае она является функцией трех инвариантов левого тензора деформации Коши–Грина. Были рассмотрены полиномиальная модель Рональда Ривлина, модифицированная модель Гука, модель Муни–Ривлина, модель Йео, модель Джента, модель Арруда–Бойса, Модель Огдена [3]. Для каждой модели было определено выражения для силы, возникающей на концах образца при плоском растяжении, и проведено исследование согласования этих моделей с экспериментальными данными.

С этой целью была разработана экспериментальная

методика исследования деформационных и силовых характеристик актуаторов, изготовленных на основе ЭДМ. Исследования происходили на специально разработанной экспериментальной установке, позволяющей осуществлять ряд технологических и метрологических операций над образцами ЭДМ. Данная установка позволяет производить предварительные удлинения образца ЭДМ в двух направлениях, для чего на стенде имеются горизонтальные и вертикальные направляющие. Оценка деформации образца ЭДМ осуществлялась с помощью метода делительных сеток, позволяющего оценить величину деформации образца с использованием бесконтактного оптического метода, основанного на регистрации картины изменения геометрии реперной сетки в процессе её смещения (рис. 1).

Используя экспериментальные данные, рассмотрено влияние краевых зон на работу актуатора. Определена зависимость одноосного удлинения от прикладываемой к образцу силы и подобрана на основании этих данных математическая модель, описывающая эту зависимость. Исследование актуатора на основе ЭДМ показало наличие гистерезиса материала образца. При исследовании деформации образца ЭДМ были выявлены две характерные зоны, в которых наблюдался различный по характеру процесс деформации материала. В первой из них характер деформации был неравномерен по площади зоны, тогда как во второй, относящейся к центральной части образца, деформация была равномерна. Разработана полуаналитическая модель, позволяющая оценить вклад «неравномерной» области в общий силовой баланс работы актуатора. Исследованы зависимости перемещение – сила для одноосного удлинения образца ЭДМ. Предложены выражения связывающие удлинение образца с величиной нагружающей образец силы.

В результате исследований из семи рассмотренных моделей, выделено, пять зависимостей, позволяющих согласовать расчетные и экспериментальные данные. Созданы алгоритм и программы подбора коэффициентов, согласования для различных моделей. Подбор коэффициентов показал, что модели Гука, Джента, Арруда–Бойса удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными лишь для относительных удлинений до 100 %. Модели Йео при $n = 2$ до 200 %, Йео при $n = 3$ около 300 %. Наилучшее согласование получено для модели Огдена (2), позволяющей корректно описать деформацию образца до 500 % (рис. 2):

$$f_{11} = Y_0 \cdot Z_0 \cdot [\mu_1 \cdot (\lambda_1 + 1)^{\alpha_1 - 1} + (\lambda_1 + 1)^{\alpha_1 + 1} + \mu_2 \cdot [(\lambda_1 + 1)^{\alpha_2 - 1} + (\lambda_1 + 1)^{-(\alpha_2 + 1)}], \quad (2)$$

где Y_0 , Z_0 – начальные размеры образца в направлении осей Y и Z ; μ_1 , μ_2 – константы материала; α_1 , α_2 – экспериментальные константы; λ_1 – относительное удлинение в направлении оси X .

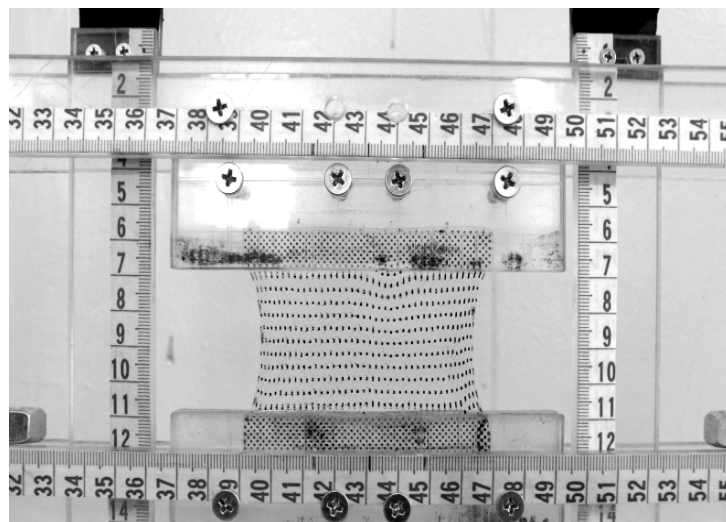


Рис. 1. Экспериментальный образец ЭДМ с нанесенной реперной сеткой

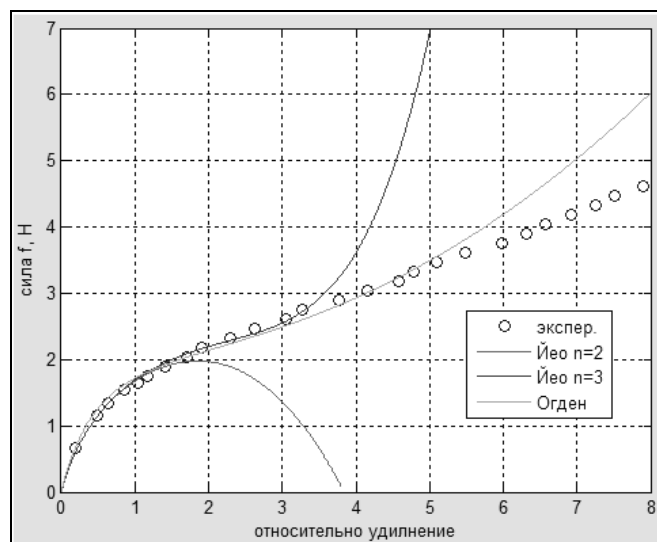


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и теоретических данных зависимости усилия растяжения от относительного удлинения

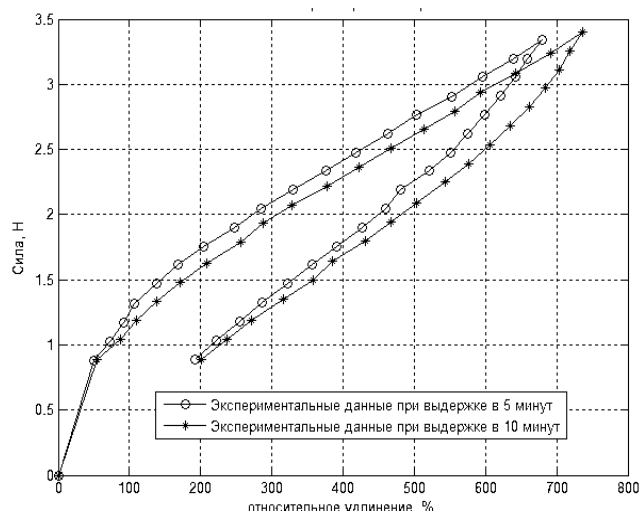


Рис. 3. Зависимости усилия растяжения от относительного удлинения при циклическом нагружении образца для различных времен выдержки между нагружениями

Обнаружено, что константы материала по модели Огдена для одноосного растяжения не соответствуют константам для двuosного растяжения, что, по-видимому, связано со значительным различием искривления краев образца при одноосном и двuosном растяжении и изменении внутренней структуры материала. Были проведены исследование деформации образца ЭДМ под действием приложенного к нему электрического напряжения.

Предварительно образец был растянут в 4 раза в одном направлении и в 3,3 раза во втором направлении. После определения перемещения, под действие напряжения, образцу давали вернуться в исходное положение, после чего к нему прикладывалось новое значение напряжения. Напряжение подавалось с помощью высоковольтного блока питания, в диапазоне от 900 до 2500 В с шагом в 100 В. Результаты, исследования показали наличие существенного гистерезиса материала (рис. 3).

Проведены работы по численному моделированию таких систем для плоских и балочных образцов ЭДМ, на основе метода КЭ, позволившие оценить влияние геометрических размеров, физико-механических и электрических характеристик актуаторов на их напряженно-деформированное состояние.

Разработаны теоретические модели ЭДМ, позволяющие осуществить проектирование актуаторов на их основе. Используя подходы, базирующиеся на оценке свободной энергии Гельмгольца, определены безразмерные характеристики такой системы, описывающие основные конструктивные показатели ЭДМ [4]. В частности, получены выражения, связывающие усилие P , развиваемое актуатором на основе ЭДМ, и напряжение питания актуатора U с величиной заряда Q на его электродах и физико-механическими характеристиками ЭДМ:

$$P/(G \cdot \varepsilon \cdot Z_0 \cdot Y_0) = \lambda_1 - t - (1/t) \cdot (Q^2/G \cdot \varepsilon \cdot X_0^2 \cdot Y_0^2) + s \cdot (\lambda_1 - \lambda_1^P), \quad (3)$$

$$U \cdot (\varepsilon/\mu)^{1/2} = (Z_0/d) \cdot \Delta, \quad (4)$$

где $t = \lambda_1^{-3} \cdot (\lambda_2^P)^{-2}$, $d = (\lambda_1 \cdot \lambda_2^P)^2$; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – относительные удлинения ЭДМ в направлении осей X, Y, Z ; $s = K \cdot X_0/(G \cdot Z_0 \cdot Y_0)$ – безразмерный коэффициент жесткости актуатора, $\Delta = Q/[X_0 \cdot Y_0 \cdot (G \cdot \varepsilon)^{1/2}]$; K – коэффициент жесткости механической части актуатора (пружины), G – модуль сдвига ЭДМ.

Эти выражения позволяют оценить влияние степени предварительной деформации ЭДМ (λ_1^P, λ_2^P), приложенного электрического напряжения U , жесткостных (K, G) и геометрических характеристик актуатора на его силовые и деформационные показатели. С использованием предложенного подхода разработана модель оценки работоспособности таких актуаторов на основе анализа термодинамических характеристик такой системы и определены критические параметры разрушения конструкции. Для анализа оптимального рабочего состояния актуатора введен параметр, названный коэффициентом актуации: $\eta = \lambda_1^{P_{\text{раз}}} / \lambda_1^0$, характеризующий предельное значение удлинения системы, где $\lambda_1^{P_{\text{раз}}}$ – максимальное значение удлинения ЭДМ, $\lambda_1^{P_{\text{раз}}}$ – при напряжении питания, равном нулю. Наличие оптимума для η , позволяет выделить наиболее рациональную зону рабочих характеристик актуаторов на основе ЭДМ для получения эффективных функциональных показателей проектируемой системы (рис. 4). Эта область ограничена, с одной стороны, зоной электромеханической неустойчивости материала (ЭМН), зоной электрического разрушения (пробоя) (ЭР) и областью потери устойчивости конструкции актуатора, а с другой – значениями возможной допустимой деформации ЭДМ (для данного материала $\lambda_1^{P_{\text{раз}}} = 5$).

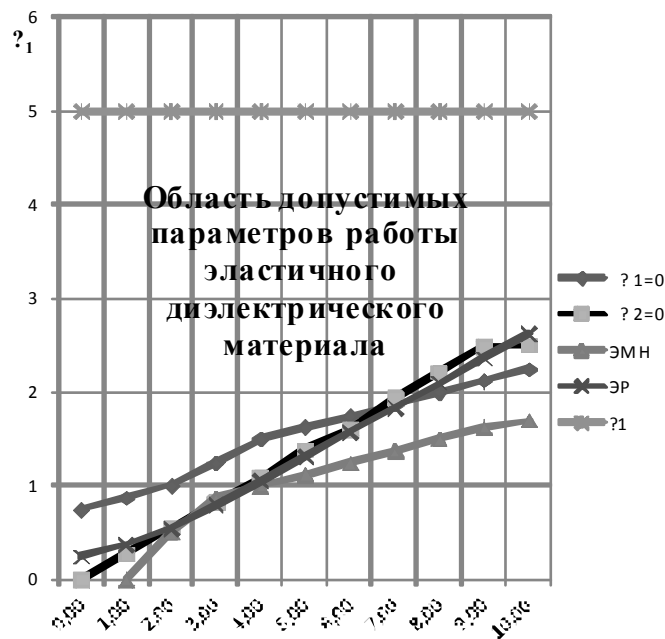


Рис. 4. Влияние физико-механических и конструктивных параметров актуатора на рабочую область

В результате проведенных исследований ЭДМ разработаны полуаналитические подходы, описывающие распределение толщины по поверхности краевых зон растянутого образца. Выделены зоны с равномерной и неравномерной деформацией образца, приводящей к неравномерности толщины ДЭМ. Выявлено, что неравномерность распределения толщины образца приводит к неравномерности распределения электростатического давления по поверхности, что, в свою очередь, влияет на выходные характеристики актуатора (усилие, перемещение). Получены зависимости перемещение – сила ДЭМ – при одноосном растяжении. Рассмотрены несколько теоретических моделей, описывающих эту зависимость. Установлено, что модель Огдена наиболее совпадает с экспериментальными данными при относительном удлинении не более 500 %. Разработаны подходы для оценки влияния физико-механических и конструктивных параметров актуатора на основе ЭДМ. Показана возможность определения рациональной зоны рабочих характеристик актуаторов на основе ЭДМ, чтобы получить наиболее эффективные функциональные показатели проектируемой системы. Создана экспериментальная методика исследования ЭДМ и проведена серия экспериментальных исследований

для оценки влияния физико-механических характеристик материала на функциональные параметры актуатора. Экспериментально показана возможность осевого перемещения образца ДЭМ под действием электрического напряжения до 200 %.

Библиографические ссылки

1. Лихачев А. Н. Методологические основы создания «интеллектуальных» конструкций формо- и размеростабильных систем космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. В 2 ч. ; СибГАУ. Красноярск, 2011.
2. Pelrine R. E., Kornbluh R. D., Joseph J. P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation // Sens. Actuators, A 64 (1998). P. 77–78.
3. Holzapfel A. (2000). Nonlinear solid mechanics – a continuum approach for engineering. Chichester, UK : John Wiley & Sons
4. Christensen R. M. Theory of viscoelasticity: an introduction. New York : Academic Press, 1981.

© Лихачев А. Н., 2012

УДК 621.833.12

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕНЬЕВ ВОЛНОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Р. С. Лукин¹, В. И. Усаков², Д. В. Вавилов¹, А. А. Иптышев³

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: rlukin88@yandex.ru

²ФГУП ЦКБ «Геофизика». Россия, 660041, г. Красноярск, ул. Киренского, 89. E-mail: adm@geockb.ru

³КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности»
Россия, 660021, г. Красноярск, ул. Карла Маркса, 134. E-mail: i@sf-kras.ru

Рассмотрено моделирование контактного взаимодействия зубьев волновой зубчатой передачи с коротким гибким колесом. Показано влияние рабочей нагрузки на характер контактного взаимодействия зубьев.

Ключевые слова: волновая зубчатая передача, кромочный контакт, метод конечных элементов.

MODELING THE INTERACTION OF THE WAVE GEAR UNITS

R. S. Lukin¹, V. I. Usakov², D. B. Vavilov¹, A. A. Iptyshev

¹Siberian Federal University. 26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: rlukin88@yandex.ru

²CDB "Geophysics". 89 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: adm@geockb.ru

³Krasnoyarsk Regional Fund for scientific and technological activities
134 Karl Marx street, Krasnoyarsk, 660021, Russia. E-mail: i@sf-kras.ru

In the paper we examine modeling of teeth contact wave gear with short flexible wheel. Shows the impact of the workload on the character of the teeth contact.

Keywords: edge contact, finite element method.

Актуальной задачей при проектировании обслуживаемых механизмов приводов космических аппаратов является обеспечение заданного срока служ-

бы. Данная задача является одной из наиболее приоритетных в совокупности с задачей обеспечения минимальной массы и габаритов. Одним из основных

элементов необслуживаемых волновых зубчатых передач (ВЗП), подверженных сильному износу, являются зубья гибкого колеса, а также дорожки качения гибкого подшипника. Существует ряд известных и реализованных конструктивных методов по повышению ресурса внутреннего колеса гибкого подшипника, в частности, обеспечение относительного поворота внутреннего кольца гибкого подшипника для более равномерного износа за счет ввода дополнительного ряда тел качения. Далее рассмотрены аспекты по управлению характером взаимодействия зубьев, применимые для ВЗП с коротким гибким колесом (ГК), где контакт ГК происходит одновременно с жестким колесом (ЖК) и зубчатой полумуфтой (ПМ).

Повреждение рабочих поверхностей зубьев является следствием сильного приработочного износа с образованием большого количества продуктов износа, работающего как абразив, а также приводящих к загустению смазки. При этом, чем меньше модуль передачи, тем более передача склонна к повреждениям, возникающим вследствие налипания части износа на рабочей поверхности зубьев. Данное обстоятельство обусловлено совокупностью нескольких факторов, в частности: кромочным взаимодействием вершин зубьев, выбором материалов, смазки [1]. Решение задачи по выбору материалов, нанесению приработочных покрытий и смазки для трущихся поверхностей, работающих в безатмосферной среде, подробно рассмотрено в работе [2]. Однако для волновых передач методика по выбору конструктивных параметров передачи для обеспечения заданного контактного взаимодействия отсутствует в явном виде. На данном этапе предлагается решать частную задачу по исследованию контактного взаимодействия зубьев передачи с целью определения характера взаимодействия зубьев.

Формулируя задачу выбора коэффициентов смещения как обеспечение заданных изгибных, знакопеременных напряжений в зоне впадины зуба и обеспечение равенства зазоров в передачах ГК и ЖК, ГК и ПМ, а также обеспечение минимальной разницы угла между профилями зубьев в точках кромочного контакта в зоне входа в зацепления, можно говорить о достаточной выносливости зуба. Используя численные методы для поиска коэффициентов смещения ЖК и полумуфты при заданных коэффициентах смещения ГК, выбранных на предварительном этапе по условию заданного минимума напряжений в выкружке зуба, можно говорить об оптимальной конструкции ВЗП, реализованной на этапе проектирования с определенной степенью условности. При варьировании величины момента дальнейший анализ, позволяет анализировать изменение характера взаимодействия звеньев под нагрузкой. «Безлюфтовость» зацепления, реализуемая за счет регулировки величины деформации для компенсации приработочного износа, можно осуществлять на любом этапе расчета за счет предварительной деформации соответствующих элементов волнового генератора. Дополнительным положительным эффектом от данного подхода к назначению коэффициентов смещения является отсутствие необходимо-

сти создания преднатяга в зацеплении. По данным предварительных исследований, преднатяг в зацеплении полумуфты создает дополнительные контактные давления в размере 200–300 МПа и увеличивает склонность передачи к интерференции зубьев при увеличении нагрузки.

Формулируя задачу по определению зазоров в зацеплении как

$$j_b(0) = j_m(\varphi) < [j_{\min}], \quad (1)$$

где минимальный зазор между зубьями ГК и ЖК (ПМ), и основываясь на известных формулах для определения зазоров в ненагруженной передаче [3], получим

$$j_i(\varphi) = [(r_i + w_{ag}(\varphi))2\pi / z_i - \max(|v_{ag}(\varphi)| + (s_{ag} + s_{yi}) / 2), |v_{yg}(\varphi)| + (s_{ai} + s_{yg}) / 2)] \cos(\alpha_y).$$

Численно решая условие (1) относительно коэффициентов смещения ЖК и ПМ и угла φ , определяющего предполагаемую зону контакта ГК и ПМ, задавшись, что минимальный зазор между зубьями ГК и ЖК соответствует $\varphi = 0$, находим значения коэффициентов смещения ЖК и ПМ при заданном коэффициенте смещения ГК и уравнении деформации волнового генератора. При этом полученный минимальный зазор выбирается с помощью регулировки волнового генератора передачи.

Рассматривая в качестве объекта исследования передачу с ГК, которое также выполняет функцию внешнего колеса гибкого подшипника, можно прийти к выводу, что данное исполнение ВЗП с коротким гибким колесом в литературе освещено не достаточно широко [3]. Несмотря на высокую технологичность данного исполнения, оно имеет ряд недостатков [5, с. 13.4], по сравнению со стандартной конструкцией, в которой внешнее кольцо гибкого подшипника установлено по свободной посадке, в частности необходимость увеличения толщины оболочки и связанный с этим рост изгибных напряжений во впадине зуба. Одним из способов уменьшения концентрации напряжений во впадине зуба является увеличение коэффициента смещения ГК [3; 4; 5, с. 13.4] для увеличения радиуса кривизны переходной кривой впадины зуба. При этом верхнее значение коэффициента смещения ограничивается не только с целью предотвращения заострения зуба, но и предотвращения интерференции выгрузки ГК и вершины сопряженной шестерни, выраженного в виде обеспечения требуемой протяженности «эвольвентного» участка профиля зуба.

Далее рассмотрен численный анализ ВЗП с коэффициентами смещения, полученными по условию (1). Для сокращения времени счета используется двумерная постановка задачи. При этом в зацеплении участвуют две контактные зоны, расположенные на противоположных сторонах гибкого колеса, что требует значительного сгущения сетки на 40–60 % зубчатой передачи.

В качестве волнового генератора используется профилированное кольцо с возможностью начальной регулировки для компенсации износа зубьев после приработочных испытаний, необходимых для снижения кон-

тактных напряжений в фазе кромочного контакта и входе и выходе из зацепления. Для определения степени регулировки волнового генератора необходимо провести предварительный численный расчет контактных напряжений и зазоров при учете регулировочной деформации волнообразователя. В данном случае безлюфтовость зацепления достигается поэтапным увеличением регулировочного зазора в генераторе до момента касания зубьев. Полученное значение регулировки используется в дальнейших расчетах.

Рассматривая величину передаваемого крутящего момента как один из основных параметров, влияющих на характер зацепления, проанализируем изменение распределения нагрузки между зубьями ГК. В данном случае представляет интерес рост изгибных и контактных на-

пряжений при увеличенной толщине оболочки ГК.

Максимальных значений эквивалентных и контактных напряжений в зависимости от момента (рис. 1). Данный график характеризует максимальные эквивалентные изгибные напряжения возникаемые во впадине зуба и максимальные контактные давления, возникающие при контакте кромки одного зуба с ножкой другого. Здесь видно, что при достаточной относительной толщине ГК, представленные зависимости коррелируют с аналогичными зависимостями для цилиндрических зубчатых передач с жесткими звеньями. При этом ресурс волновой передачи лимитируется не контактными давлениями, а изгибными знакопеременными напряжениями, возникающими у ножки зуба.

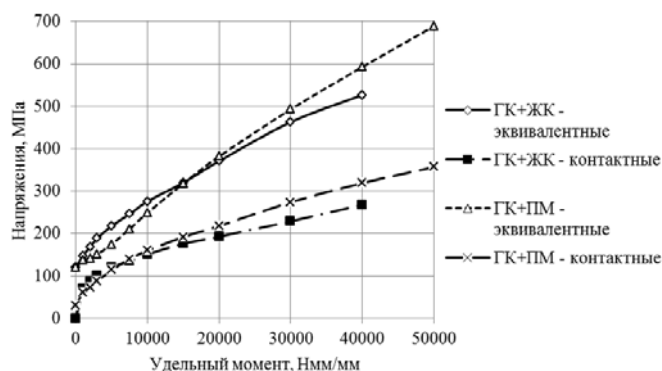


Рис. 1. Изменения эквивалентных и контактных напряжений в зависимости от момента (контакт ГК и ЖК)

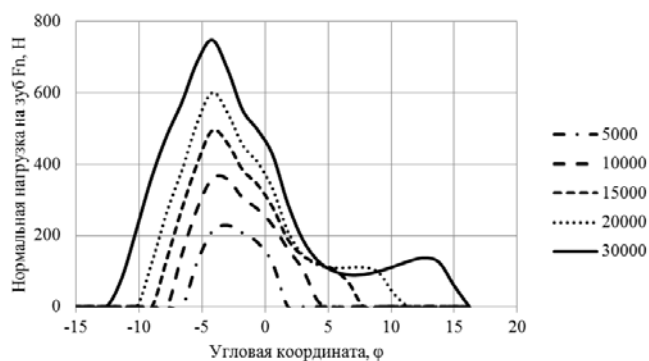


Рис. 2. Распределение нагрузки между зубьями при различном нагружении передачи (контакт ГК и ЖК)

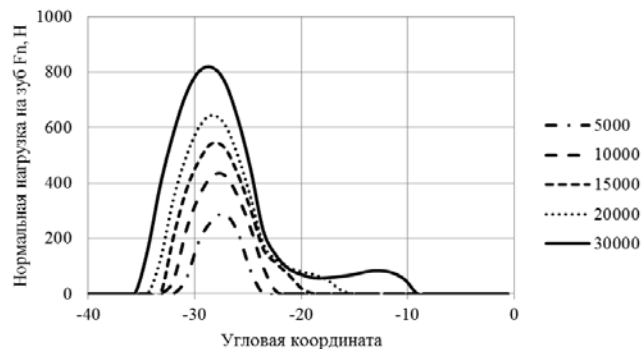


Рис. 3. Распределение нагрузки между зубьями при различном нагружении передачи (контакт ГК и ПМ)

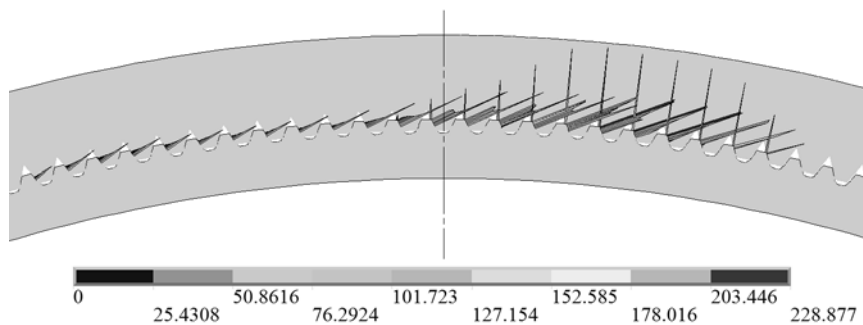


Рис. 4. Характер зацепления зубьев гибкого и жесткого колеса

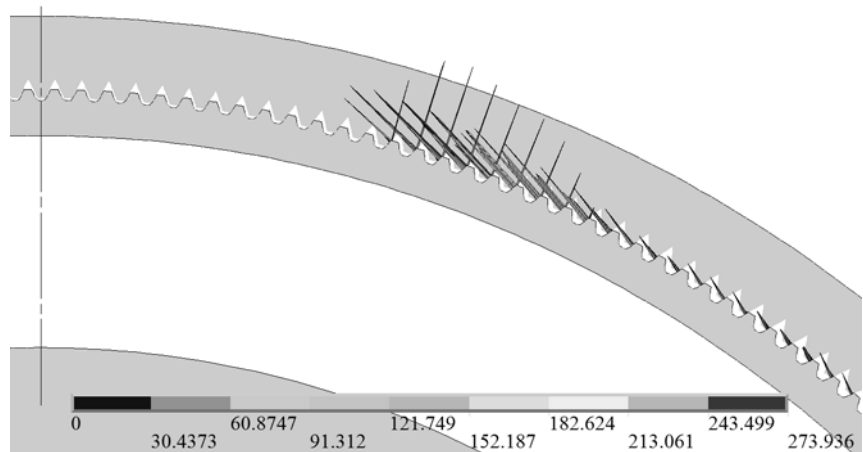


Рис. 5. Характер зацепления зубьев гибкого колеса и полумуфты

Результирующая сила в зацеплении ГК и ЖК смещена относительно главной оси волнового генератора на $-2...-3$ градуса (рис. 2). Аналогичное смещение для пары ГК и ПМ составляет $-27...-26$ градусов (рис. 3). При этом рост количества зубьев, находящихся в зацеплении, пропорционален нагрузке. Представленные ранее кривые распределения нагрузки интересны с точки зрения последующего анализа распределения нагрузки между шариками гибкого подшипника. Исходя из полученных значений приходим к выводу, что в данном случае возможен перекося образующих ГК как в радиальном, так и окружном направлении, вследствие относительного смещения результирующей нагрузки в зацеплении. В данном случае это приведет к неравномерному распределению нагрузки вдоль зуба [1]. Анализ графиков (рис. 2, 3) показал, что отжатие ГК, проявляющееся в изменении кривой распределения нагрузки между зубьями, наступает при удельном моменте выше 15 кНмм/мм . При этом величина перераспределяемой нагрузки незначительна ($10-15\%$ от номинальной). Сравнивая результаты с экспериментальными данными исследования ГК с раздельным внешним кольцом гибкого подшипника, можно прийти к выводу о повышенной радиальной жесткости данного исполнения ГК.

Далее представлены результаты КЭ моделирования зацепления волновой передачи при удельном моменте на выходном звене $30\,000 \text{ Нмм}$. Данный случай можно считать предельным как с точки зрения изгибных напряжений, так и с точки зрения рекомендован-

ных контактных давлений, обеспечивающих приемлемую степень износа контактирующих поверхностей, работающих в вакууме [2].

Усилия распределены достаточно неравномерно вдоль зуба ГК, что говорит о возможном кромочном контакте зубьев (рис. 4, 5). Одним из способов устранения данного неблагоприятного явления является приработка. Процесс предварительной приработки волновой передачи дает следующие преимущества [5], по сравнению с бесприрабочим запуском привода в эксплуатацию: получение равновесной шероховатости; ликвидация заостренных кромок зубьев как источника крупных частиц износа, которые в процессе работы могут попадать в смазочный материал и приводить к загустеванию смазки и интенсификации процесса абразивного износа. При этом удаление продуктов прирабочного износа проходит в процессе замены смазочного материала на эксплуатационный. Сравнивая эпюры напряжений (рис. 4, 5) можно прийти к выводу, что контакт вблизи вершины волны деформации предпочтителен с точки зрения большей глубины захода зуба в зацепление. Данное обстоятельство объясняет больший износ боковой поверхности зуба ГК контактирующего с полумуфтой [5]. При этом неравномерность распределения нагрузки, вызванная перекося образующих, смещает наиболее поврежденную область зубьев в сторону центра ГК.

Рассмотрены базовые аспекты и ограничения по выбору коэффициентов смещения, позволяющие управлять характером контактного взаимодействия,

на этапе проектирования ВЗП, с применением модельного подхода для анализа (реализованного в виде конечно-элементного расчета). Приведен анализ влияния нагрузки на характер взаимодействия звеньев ВЗП с коротким гибким колесом, которое одновременно выполняет роль внешнего кольца гибкого подшипника. Предложено рассматривать систему проектных параметров ВЗП во взаимосвязи с условиями эксплуатации с учетом минимизации износных процессов и обеспечения заданной точности отработки угловых перемещений.

Библиографические ссылки

1. Усаков В. И. Обеспечение работоспособности механизмов приводов космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. В 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. Ч. 1.

2. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н. Трение и износ в экстремальных условиях : справочник. М. : Машиностроение, 1986.

3. Иванов М. Н. Волновые зубчатые передачи. М. : Высшая школа, 1981.

4. Марчук А. С. Аналитический способ назначения параметров переходной кривой зуба эвольвентной передачи // Вестник Белорус. нац. техн. ун-та. 2004. № 3. С. 71–80.

5. Механика современных специальных систем: технологии, оборудование, исполнительные системы, устройства, узлы, проектирование, показатели качества, САПР : монография. В 3 т. Т. 3 / Н. В. Василенко [и др.] ; под ред. Н. В. Василенко, Н. И. Галибей. Красноярск : Печатные технологии, 2004. Т. 3.

© Лукин Р. С., Усаков В. И., Вавилов Д. В.,
Иптышев А. А., 2013

УДК 629.78.051.017.1

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ТИПОВОЙ ПРОГРАММЫ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ ИНОСТРАННОГО ПРОИЗВОДСТВА, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ ДЛИТЕЛЬНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Р. А. Матюшев, В. Е. Патраев

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: mroman@iss-reshetnev.ru

Рассмотрены проблемные вопросы применения электрорадиоизделий иностранного производства (ЭРИ ИП), проблемы проведения сертификационных испытаний, зарубежные уровни качества интегральных микросхем иностранного производства, а также вопросы разработки типовой программы сертификационных испытаний ЭРИ ИП.

Ключевые слова: ЭРИ ИП, сертификация, надежность.

QUESTIONS OF DEVELOPMENT OF A STANDARD PROGRAM OF CERTIFIED TESTS OF ELECTRIC RADIO PRODUCTS OF FOREIGN MANUFACTURE APPLIED IN DOMESTIC SPACECRAFTS OF LONG FUNCTIONING

R. A. Matyushev, V. E. Patraev

JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems”
52, Lenin street, Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: mroman@iss-reshetnev.ru

Problem questions of application of foreign electric radio products, problems of certified test operations, foreign levels of quality of integrated chips of foreign production, as well as questions of development of a standard program of certified tests of foreign electric radio products are considered.

Keywords: foreign electric radio products, certification, reliability.

Существенное технологическое отставание в отечественном производстве электрорадиоизделий вынудило предприятия, занимающиеся изготовлением современных и перспективных отечественных космических аппаратов (КА) со сроками активного существования (САС) 15 и более лет использовать ЭРИ ИП.

Анализ эксплуатационной надежности ряда современных отечественных КА показал, что на этапе

эксплуатации преобладают неисправности, связанные с отказами ЭРИ, поэтому вопросы обеспечения и повышения надежности применяемой ЭКБ, принимают первостепенное значение [1; 2].

БА современных КА комплектуется электрорадиоизделиями отечественного и иностранного производства. Изготавливаемые отечественные ЭРИ ОП отличаются ограниченной номенклатурой и такими

техническими показателями, которые не позволяют в полной мере реализовать требуемые эксплуатационно-технические и массо-габаритные характеристики БА КА, например, обеспечить требуемые точность, радиационную стойкость, минимальную наработку на отказ и сложные схемотехнические решения. В связи с этим, при разработке БА применяются ЭРИ ИП. Доля импортной микроэлектроники в аппаратуре преобладает и зависит от типа и назначения КА. Например, в КА коммерческого назначения она достигает 80 % [4].

При создании таких КА необходимо применение соответствующей методологии обеспечения надежности КА и составных частей [3], что неразрывно связано с целым комплексом проблем по их сертификации [4]:

- отсутствием типовой программы проведения сертификационных испытаний ЭРИ ИП уровня качества Military и Space;
- отсутствием типовой программы проведения отбраковочных испытаний ЭРИ ИП уровня качества Industrial;
- проблемой рационализации объемов сертификационных испытаний.

Рассмотрим основные проблемы разработки типовой программы проведения сертификационных испытаний ЭРИ ИП уровня качества Military и Space.

Для начала на примере интегральных микросхем рассмотрим вопрос об определении уровней качества Military и Space. Общая спецификация на монолитные интегральные микросхемы определяет следующие классы: M, N, Q, V, B, S, T [5].

Стоит отметить, что уровень качества (согласно MIL-PRF-38535) определяется исходя из объема пройденных испытаний. Наибольший объем испытаний проходят классы Q и V.

Под объемом испытаний понимается количество видов отбраковочных испытаний и их режимы.

Если сравнить уровни качества Q и V, то можно сделать вывод, что ЭРИ ИП уровня качества V проходят наибольший объем испытаний. Уровень V, таким образом, будем условно обозначать как уровень качества Space, а уровень Q будем условно обозначать как уровень качества Military.

Приведем объемы отбраковочных и квалификационных испытаний, а также их сравнение с требованиями отечественной документации (табл. 1, 2) [5; 6].

Таблица 1

Объем отбраковочных испытаний по MIL-PRF-38535 и по ОСТ В 11 0398–2000

Объем отбраковочных испытаний по MIL-PRF-38535	Объем отбраковочных испытаний по ОСТ В 11 0398–2000
Electrostatic Discharge Sensitivity (ESD) (Чувствительность к разряду статического электричества)	Отсутствует*
Wafer acceptance (Приемка пластин)	Отсутствует
Internal visual (Внутренний визуальный контроль)	Имеется
Temperature cycling (Термоциклирование)	Отсутствует
Constant acceleration (Линейное ускорение)	Имеется
Serialization (Сериализация)	Отсутствует
Interim (pre burn-in) electrical parameters (Измерение электрических параметров перед ЭТТ)	Имеется
Burn-in test (ЭТТ)	Имеется
Interim (post burn-in) electrical parameters (Измерение электрических параметров после ЭТТ)	Имеется
Percent Defective Allowable (PDA) calculation (Подсчет процента микросхем, прошедших в негодность после ЭТТ)	Отсутствует
Final electrical test (Измерение электрических параметров)	Имеется
Seal (Тест на герметичность в гелиевой среде и в барокамере)	Имеется
External visual (Визуальная проверка внешнего вида)	Имеется

* Имеется в объеме квалификационных испытаний по ОСТ В 11 0398–2000.

Таблица 2

Объем квалификационных испытаний по MIL-PRF-38535 и по ОСТ В 11 0398–2000

Вид группы	Объем квалификационных испытаний по MIL-PRF-38535	Объем квалификационных испытаний по ОСТ В 11 0398–2000
Group A (Группа А)	Electrical tests. (Электрические испытания)	Имеется
Group B (Группа Б)	Resistance to solvents (На стойкость к растворителям)	Отсутствует
	Bond strength (Испытание выводов на воздействие растягивающей силы)	Имеется
	Die shear test or stud pull (Испытание на сдвиг кристалла или испытание на прочность выводов)	Имеется
	Solderability (Стойкость к пайке)	Имеется
Group C (Группа В)	Steady-state life test (Испытание на долговечность)	Имеется
Group D (Группа Г)	Physical dimensions (Физические размеры)	Имеется
	Lead integrity (Целостность выводов)	Имеется

Вид группы	Объем квалификационных испытаний по MIL-PRF-38535	Объем квалификационных испытаний по ОСТ В 11 0398–2000
Group D (Группа Г)	Seal (Тест на герметичность в гелиевой среде и в барокамере)	Имеется
	Thermal shock (Термоудар)	Отсутствует
	Temperature cycling (Термоциклирование)	Имеется
	Moisture resistance (Стойкость к влаге)	Имеется
	Seal (Тест на герметичность в гелиевой среде и в барокамере)	Имеется
	Visual (Визуальная проверка внешнего вида)	Имеется
	Shock (Удар одиночного действия)	Имеется
	Vibration, variable frequency (Вибрация)	Имеется
	Acceleration (Линейное ускорение)	Имеется
	Seal (Тест на герметичность в гелиевой среде и в барокамере)	Имеется
	Visual examination (Визуальная проверка внешнего вида)	Имеется
	Salt atmosphere (На воздействие соляного тумана)	Имеется
	Seal (Тест на герметичность в гелиевой среде и в барокамере)	Имеется
	Visual (Визуальная проверка внешнего вида)	Имеется
	Internal water vapor (Наличие паров воды в подкорпусном пространстве)	Имеется
	Adhesion of lead finish (Целостность покрытия выводов)	Отсутствует
	Lid torque (Герметичность)	Отсутствует

Согласно данным табл. 1, 2 можно сделать следующие выводы.

1. В объеме отбраковочных испытаний, регламентированных отечественной НТД, отсутствуют:

- Electrostatic Discharge Sensitivity (ESD) (Чувствительность к разряду статического электричества);
- Temperature cycling (Термоциклирование);
- Percent Defective Allowable (PDA) calculation (Подсчет процента микросхем, пришедших в негодность после ЭТТ).

2. В объеме квалификационных испытаний отсутствуют:

- Resistance to solvents (Испытаний на стойкость к растворителям);
- Thermal shock (Термоудар);
- Adhesion of lead finish (Испытание на целостность покрытия выводов);
- Lid torque (Испытание на герметичность).

Важно отметить тот факт, что в табл. 1, 2 не отображены требования, которые отсутствуют в MIL-PRF-38535, но присутствуют в отечественной документации.

В настоящее время формируется два подхода к проведению сертификационных испытаний:

- по определению уровня качества;
- по определению объема испытаний.

В первом подходе подразумевается, что наличие сертификата изготовителя достаточно для определения уровня качества. Такой подход приводит к упрощению СИ, но это идет в ущерб надежности КА, и не исключает применение контрафактных ЭРИ ИП.

При втором подходе подразумевается, что необходимо тщательно изучать объем и методы проведения испытаний ЭРИ ИП на этапе изготовления и прохождения квалификации.

Второй подход можно считать предпочтительнее по нескольким причинам, в частности:

- **позволяет выявить отличия в методах проведения испытаний** в зарубежной документации;

– **позволяет определить состав проведения испытаний ЭРИ ИП** на этапе изготовления и квалификации.

– позволяет сравнить требования, предъявляемые к ЭРИ отечественной НТД;

– позволяет установить возможность применения ЭРИ ИП без проведения дополнительных испытаний на территории РФ;

– позволяет проводить контроль за ЭРИ ИП, например, прослеживать номер пластины, на которой были проведены испытания.

Разумеется, отсутствие, какого либо испытания в зарубежной документации не означает, что требование к данному виду испытания можно не предъявлять по причине его отсутствия. В данном случае есть два пути:

- проведение испытаний;
- признание данного испытания пройденным, если были проведены испытания в процессе изготовления и квалификации ЭРИ ИП, которые косвенно могут подтвердить выполнение требований к ЭРИ ИП.

В данном случае, необходимо принятие **технически обоснованных решений, опираясь на отечественную нормативную документацию.**

Таким образом, можно сделать вывод, что при разработке типовой программы сертификационных испытаний необходимо руководствоваться подходом в виде тщательного анализа объемов и методов проведения испытаний ЭРИ ИП, позволяющим исключить использование контрафактных ЭРИ ИП, а также ЭРИ ИП низкого уровня качества. В свою очередь, это приведет к обеспечению качества партий ЭРИ ИП и, следовательно, к обеспечению надежности БА КА длительного функционирования.

Библиографические ссылки

1. Матюшев Р. А., Патраев В. Е., Кочура С. Г. Вопросы обеспечения надежности бортовой аппара-

туры космических аппаратов длительного функционирования // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2011. Ч. 1.

2. Патраев В. Е., Трифанов И. В. Анализ показателей качества и надежности при эксплуатации современных космических аппаратов // Вестник СибГАУ. Красноярск, 2010. Вып. 2(28). С. 110–113.

3. Патраев, В. Е. Методы обеспечения и оценка надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования : монография ; СибГАУ. Красноярск, 2010.

4. Матюшев Р. А., Патраев В. Е. Вопросы сертификационных испытаний электрорадиоизделий иностранного производства, применяемых в отечественных космических аппаратах длительного функционирования // Авиакосмическое приборостроение. Москва, 2012. Вып. 9.

5. MIL-PRF-38535. Performance specification. Integration circuits (microcircuits) manufacturing, general specification for.

6. ОСТ В 11 0398-2000. Микросхемы интегральные. Общие технические условия.

© Матюшев Р. А., Патраев В. Е., 2013

УДК 629.78.015

НОРМИРОВАНИЕ И ОТРАБОТКА БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

С. А. Орлов, В. И. Копытов

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: srgorlov@iss-reshetnev.ru

Рассматриваются проблемы, возникающие при нормировании и отработке бортовой аппаратуры КА негерметичного исполнения на механические воздействия. Предлагаются подходы, позволяющие сформировать режимы испытаний бортовой аппаратуры на основе результатов измерений нагрузок на различных этапах испытаний КА, и реализовать их на этапе автономной отработки бортовой аппаратуры.

Ключевые слова: аппаратура, спектральная плотность, ударный спектр ускорений.

RATE MAKING AND DEVELOPMENT OF SPACECRAFT ONBOARD EQUIPMENT TO MECHANICAL ENVIRONMENT

S. A. Orlov, V. I. Kopytov

JSC “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”
52 Lenin street, Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: srgorlov@iss-reshetnev.ru

The article considers the problems appearing at rate making and development of spacecrafts onboard equipment of unpressurized type of enclosure on mechanical excitation. Proposed approaches are able to generate test environment of onboard equipment, on the basis of results of measurements at different stages of spacecraft testing, and implement them at the stage of autonomous development of on-board equipment.

Keywords: equipment, spectral density, shock spectrum of accelerations.

В настоящее время отечественные, как и зарубежные космические аппараты (КА), стали выполняться по негерметичной схеме. Силовой основой таких КА являются сотовые панели и конструкции из композиционных материалов. В результате чего меняются жесткостные и демпфирующие свойства КА, способы крепления бортовой аппаратуры (БА), и как следствие, нагрузки на сами КА и входящую в их состав аппаратуру. В тоже время существующая нормативная документация, регламентирующая нагрузки на БА, и методики отработки, остаются неизменными уже более 30 лет и значительно отличаются от действующих зарубежных стандартов [1; 2]. Выходом из сложившейся ситуации является разработка методик нормирования и испытаний БА по результатам изме-

рений нагрузок на различных этапах испытаний КА с последующей автоматизированной обработкой экспериментальных данных, так как результаты измерений даже одного КА требуют обработки и анализа сотен, а то и тысяч виброграмм.

При разработке и испытаниях бортовой аппаратуры космических аппаратов необходимо учитывать все внешние воздействующие факторы. Информацию о механических нагрузках на КА и аппаратуру несет в себе нормативная функция внешнего нагружения (воздействия), являющаяся непрерывно изменяющимся пространственным векторным полем системы функций времени и нагрузки [3]. Ошибка в задании величины нагрузок на бортовую аппаратуру или неправильная оценка их влияния может привести либо

к отказу аппаратуры при эксплуатации, либо к необоснованному увеличению массы приборов и агрегатов и расходов на дополнительную отработку.

Нагрузки, действующие на космический аппарат на участке выведения. Нагрузки, действующие на КА, включают в себя квазистатические, вибрационные, ударные и акустические воздействия [1–3]. Квазистатические нагрузки действуют в частотном диапазоне до 10 Гц. Источником воздействий служат низкочастотные колебания ракеты-носителя (РН). Гармоническая вибрация действует в диапазоне частот 5–100 Гц. Источником гармонической вибрации служат колебания различных агрегатов и подсистем РН, а также вибрационные нагрузки на этапе приемных испытаний. Широкополосная случайная вибрация (диапазон 20–2000 Гц) – это отклик конструкции КА на акустическое воздействие (диапазон 20–8000 Гц). Источником ударных воздействий являются различные пиротехнические устройства РН (разделение ступеней ракеты, сброс обтекателя, дополнительных топливных баков и т. д.) и КА (отделение КА от РН, раскрытие солнечных батарей, различных антенн и других подсистем). В общем случае на КА может быть не один десяток различных пироустройств. Требования по ударным воздействиям на КА и бортовую аппаратуру задают в форме ударных спектров ускорений в диапазоне частот до 10 кГц (как правило, при добротности равной 10).

Зонное нормирование и необходимый объем испытаний. Для формирования требований к аппаратуре применяется «зонное нормирование». Под «зоной механических нагрузок» понимается некоторая область КА, в которой приборы и оборудование подвергаются близкими по величине воздействиям [3]. Необходимое количество зон устанавливается разработчиком КА и определяется количеством и типом (массой) применяемого на КА оборудования (для вибрационных воздействий). Некоторые рекомендации по разработке зон содержится в [4; 5]. Полностью формализовать определение «зона механических нагрузок» не представляется возможным, хотя некоторые общие критерии можно выделить: вид и направление воздействия, требования по амплитудному и частотному диапазонам, тип и масса оборудования. При вибрационных воздействиях сформированные зоны отличаются в первую очередь амплитудными значениями спектральной плотности мощности и среднеквадратическими значениями виброускорений (частотный диапазон остается неизменным). Разработка оптимального количества зон для оборудования представляет собой определенную методологическую проблему. Большое количество зон приводит к сужению границ их диапазонов и может вызывать трудности при заимствовании оборудования в другие проекты без проведения дополнительных испытаний. Малое количество зон влечет за собой необоснованное завышение режимов испытаний для оборудования. Очевидным является разделение оборудования, находящегося на модуле полезной нагрузки и модуле служебных систем, а также оборудование, устанавливаемое на консольных элементах, на рефлекторах антенн

в разные зоны. Значения спектральной плотности мощности виброускорений для различных зон могут отличаться в десятки и сотни раз. Типовые спецификации на бортовую аппаратуру, основанные на зонном нормировании как для отечественных, так и для зарубежных КА, представлены в [4; 5]. Следует отметить, что испытания на низкочастотную гармоническую вибрацию (диапазон 5–100 Гц) при выполнении общепринятых требований по отсутствию резонансов конструкции аппаратуры до 150 Гц не проводятся. Стойкость к вибрационным воздействиям может быть подтверждена даже анализом на квазистатические нагрузки. Исключение составляет аппаратура системы ориентации, лазерно-оптические средства приема и передачи информации, включающие в себя различные электромеханические приводы. Предъявление требований по отсутствию резонансных частот к механизмам (даже в диапазоне частот до 40 Гц) некорректно, если этот механизм не фиксируется на участке выведения. Испытания на акустические воздействия аппаратуры также не проводятся (в силу небольшой площади поверхности большинства аппаратуры), а защищается аппаратура на данный вид механических (акустических) нагрузок подбором комплектующих и положительными результатами испытаний на случайную вибрацию. Таким образом, к обязательным видам воздействий, на которые должны отрабатываться приборы и аппаратура, относятся широкополосная случайная вибрация и ударные воздействия.

Нагрузки, действующие на бортовую аппаратуру и комплектующие. Нормируемые величины спектральной плотности мощности виброускорений (СПУ) могут достигать величин в десятки единиц $g^2/Гц$ (например, на аппаратуре рефлекторов антенн). Следует отметить, что требования на аппаратуру в отечественных стандартах по случайной вибрации (стандарты группы «Мороз») не превышают $0,05 g^2/Гц$, а на комплектующие (стандарты группы «Климат») не предполагают уровни вибрационных воздействий выше $0,5 g^2/Гц$. При этом максимальная величина среднего квадратического значения виброускорения (СКЗ) на комплектующие составляет 50g. Спецификация по СПУ для широкополосной случайной вибрации на консольно установленный двигатель коррекции, сформированная по результатам испытаний КА показана на рисунке.

Максимальные уровни СПУ составляют величину $1 g^2/Гц$, при этом СКЗ составляет величину $\sim 15g$, т. е. нормируемая величина СПУ для прибора уже превышает максимально допустимые значения на комплектующие. Для оценки нагружения комплектующих аппаратуры необходимо учесть добротность конструкции, которая, как правило, находится в диапазоне $Q = 10 - 30$, при этом аппаратура сохраняет работоспособность. Таким образом, не величина СПУ в первую очередь влияет на работоспособность прибора, а определяющей характеристикой является величина СКЗ виброускорения. Следует отметить, что не для всех комплектующих имеются спецификации по случайной вибрации. Для некоторых электрорадиоизделий (ЭРИ) требования задают в виде гармонической

вибрации в диапазоне частот до 2 кГц. Наиболее часто для пересчета одного вида вибрационного воздействия в другой используется формула Майлса (формула построена на основе гипотезы суммирования линейных повреждений) [7; 8]:

$$A(f_p) = 3\sigma = 3\sqrt{\frac{\pi}{2} f_p Q S_{\text{вх}}(f_p)},$$

где $A(f_p)$ – значение амплитудного спектра на частоте f_p ; $S_{\text{вх}}(f_p)$ – значение спектральной плотности широкополосной случайной вибрации на основной частоте собственных колебаний элемента конструкции (задается нормативной функцией); Q – добротность; f_p – значение собственной частоты колебаний элемента конструкции в рассматриваемом диапазоне частот (принимается по результатам модального анализа); σ – среднеквадратическое значение ускорения.

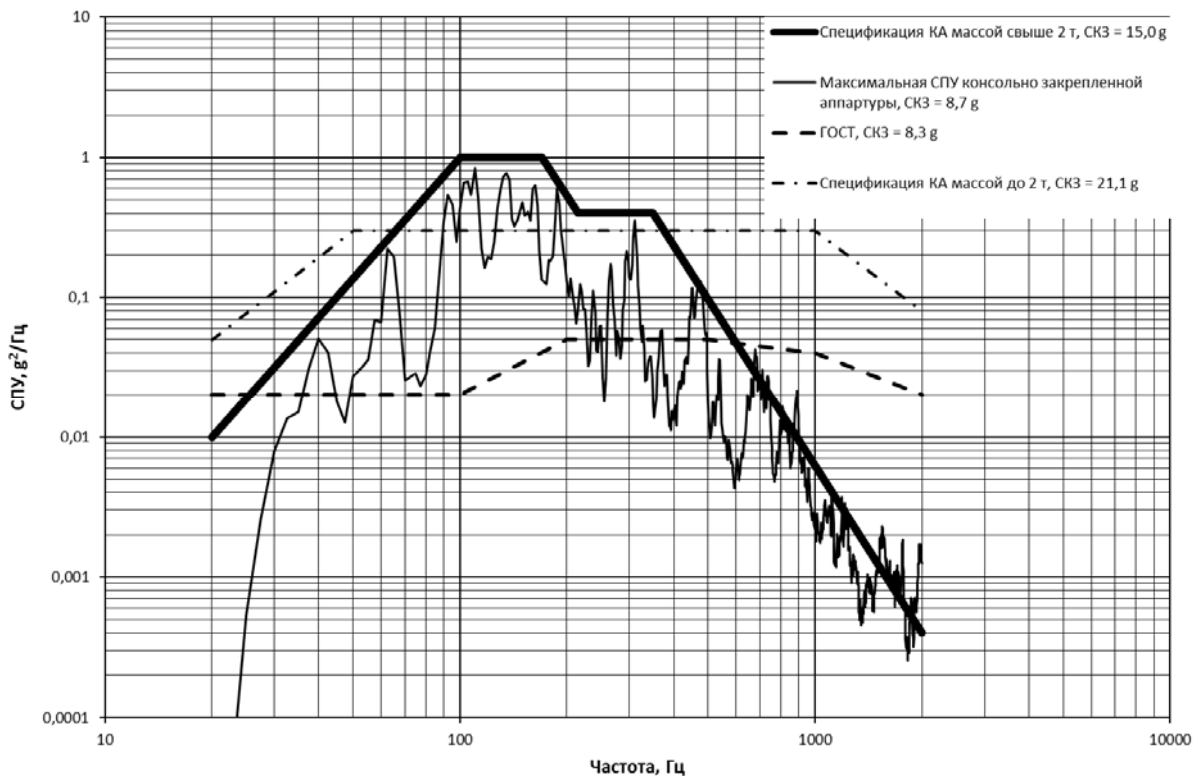
Данная формула позволяет получить отклик на ЭРИ в виде гармонической вибрации на воздействие, заданное в виде широкополосной случайной вибрации. Следует отметить, что рассмотренная формула показывает максимально возможный отклик на резонансной частоте (на уровне 3σ), т. е. амплитудные значения не превышают данный уровень с вероятностью 0,997, и, согласно определению ударного спектра ускорений как максимально возможной реакции осциллятора на данной частоте [6], такое представление скорее можно использовать для формирования эквивалентного ударного спектра ускорений (УСУ). Оценку амплитудного спектра гармонической вибрации более корректно проводить по формуле [8]

$$A(f) = \sqrt{2}\sigma,$$

где $A(f)$ – значение амплитудного спектра на частоте f , σ – среднеквадратическое значение ускорения.

По ударным воздействиям нормирование проводится в форме ударных спектров ускорений, величина которых устанавливается, как правило, в зависимости от расстояния от источника ударных воздействий. Значения УСУ могут достигать величин в тысячи g [5]. При этом в отечественных стандартах на ЭРИ (и в некоторых зарубежных) требования по ударным спектрам отсутствуют. Спецификации по ударным воздействиям на ЭРИ чаще всего задают в виде одиночных импульсов полуволны синусоиды (указывается амплитуда и длительность удара, а также допустимое количество ударов).

Анализ бортовой аппаратуры на механические воздействия. До начала испытаний (как на этапе проектных работ, так и по завершении рабочего проектирования) в обязательном порядке должен проводиться механический анализ аппаратуры (анализ аппаратуры на механические воздействия), который позволяет выявить возможные недостатки разрабатываемой аппаратуры. Однако для этого нужны специализированные пакеты прикладных программ типа NASTRAN, ANSYS, DYTRAN и т. д. [9–11]. Кроме того, требуются мощные рабочие станции и квалифицированный персонал, имеющий опыт работы в этих вычислительных средах. Одной из основных проблем на этом этапе работ является принятие модели демпфирования. Для бортовой аппаратуры, имеющей прототипы, данная проблема несколько сглаживается, так как позволяет принять модель демпфирования по результатам испытаний прототипов.



СПУ на консольно установленный двигатель коррекции

Для аппаратуры, не имеющей прототипов, принимается чаще всего модель с постоянным демпфированием (добротность Q выбирается из диапазона 20–30 для анализа вибрационных воздействий и 10 для анализа ударных нагрузок при использовании универсальных пакетов типа *NASTRAN*, *ANSYS*). В специализированных пакетах типа *DYTRAN* предназначенных для анализа высокоинтенсивных ударных воздействий применяются иные модели демпфирования. Коэффициент демпфирования принимается в виде комбинированной псевдовязкости, представляющей из себя сумму квадратичной (псевдовязкость Неймана-Рихтмайера) и линейной псевдовязкостей, а также в виде вязкого демпфирования [10]. Другая серьезная проблема заключается в обосновании полученных результатов. Развитие компьютерного моделирования привело в последние годы к возникновению технологии «Верификации и валидации (*Verification and Validation*)» или *V&V*» как технологической и интеллектуальной дисциплины, которая исследует проблему подтверждения полученных результатов и предсказания новых. Верификация является процессом, исследующим качество численного приближения математической модели, используемой как основу для предсказания, а валидация является процессом, изучающим надежность математической модели как точного обобщения реальности. В процедуре «валидация» подразумевается решение множества задач верификации. Эти задачи являются специфическими математическими задачами, для которых некоторые входные данные такие же, как и для задачи верификации, но часть задач может и отличаться. Например, в задаче упругости область определения и граничные условия различны для задач верификации и валидации, но материальное уравнение одно и то же. При этом задачи верификации и валидации всегда отличаются, а задача верификации часто не доступна экспериментальной проверке [12; 13]. По результатам механического анализа устанавливается необходимый объем испытаний бортовой аппаратуры. Вместе с тем серьезной проблемой является и доверие заказчика к качеству выполненных работ. При отсутствии доверия к результатам механического анализа объем испытаний может быть не обосновано велик.

Испытания на широкополосную случайную вибрацию. Для проведения вибрационных испытаний требуются достаточно мощные стенды с современной системой управления и многоканальной системой регистрации. Испытания стандартной БА на вибрационные нагрузки при наличии стендов, средств управления и регистрирующей аппаратуры каких – либо затруднений не вызывают. Но особенностью вибрационных испытаний является то, что это вид кинематического возбуждения оборудования. В результате таких воздействий в аппаратуре могут возбуждаться резонансы с большими амплитудами, которые на КА не реализуются. Для корректировки входного воздействия была предложена следующая процедура «вырезания» (*notching*). Сначала определяются резонансные частоты аппаратуры и добротность на каждой резонансной частоте. Затем выполняется прогноз отклика

на элементах конструкции в зоне резонансов, причем при превышении допустимых значений амплитуды ускорений на бортовую аппаратуру проводят корректировку заданного воздействия в области резонансных частот по приведенной ниже формуле

$$\Delta\Omega_i = 2\Delta f_i + \delta_i = \frac{f_{pi}}{Q_i} + \delta_i$$

где $\Delta\Omega_i$ – ширина частотного диапазона; $2\Delta f_i$ – эффективная ширина пропускания колебательного звена на i резонансной частоте; Q_i – добротность на i резонансной частоте; f_{pi} – i резонансная частота; δ_i – погрешность задания диапазона частот на i резонансной частоте, при этом амплитуду нагружения корректируют по формуле

$$\Psi_{i1} \geq \frac{\Psi_{i0}}{\eta_i},$$

где Ψ_{i1} – амплитуда откорректированного нормированного воздействия на i резонансной частоте; Ψ_{i0} – амплитуда заданного нормированного воздействия на i резонансной частоте; ξ_i – квалификационный коэффициент на i резонансной частоте; η_i – коэффициент изменения амплитуды заданного нормированного воздействия на i резонансной частоте, здесь

$$\xi_i \geq \eta_i \geq 1,$$

при этом наклон уменьшения/возрастания в области резонансов корректируемого воздействия принимают из диапазона 20–30 дБ/окт, исключающего возникновение при испытаниях переходных процессов, а глубина вырезания не превышает коэффициента квалификации для резонансов оборудования. Когда источником резонансов является испытательная оснастка, то вырезание может быть более глубоким, но не должно превышать уровень устойчивого управления вибрационным воздействием. Профиль вырезаний формируется, как правило, по результатам механического анализа оборудования и наиболее часто применяется при корректировке режимов испытаний для антенн в низкочастотной области, и в высокочастотной области для стандартной аппаратуры. В тоже время, на сегодняшний день нет корректного обоснования этой процедуры. Большинство авторов признают только допустимость вырезаний на резонансных частотах в пределах коэффициента квалификации, да и то при одобрении этой процедуры заказчиком аппаратуры [8; 14; 15].

Испытания на ударные воздействия. На сегодняшний день существуют различные методы испытаний на ударные воздействия с помощью вибрационных электродинамических стендов, стендов с падающими столами, маятниковых и т. д. Методы испытаний могут использовать задание ударного воздействия в форме полусинусоидального импульса или по ударному спектру ускорений, когда не важен вид ударного воздействия, а важна реакция, которую это воздействие вызывает в конструкции [6; 16; 17]. Если источником ударных воздействий являются пиротехнические устройства, то испытания рекомендуется проводить на стендах, имеющих пиротехнические элементы. В противном

случае нарушается физика ударного нагружения, так как трудно воспроизвести необходимый амплитудный и частотный диапазоны, а вместо испытаний в проходящей ударной волне, когда ударное воздействие уменьшается при удалении от источника удара, при кинематическом возбуждении (например, стенды с падающими столами) все элементы аппаратуры подвергаются максимальным ударным воздействиям. Самый простой способ ударных испытаний – это срабатывание штатных устройств, от которых будет нагружаться оборудование в составе изделия. В результате обработки получают ударные спектры в местах установки оборудования, которые и служат основанием для формирования спецификаций по ударным воздействиям при автономных испытаниях (эксплуатационные значения умножаются на коэффициент безопасности). При автономных испытаниях такой метод не применяют, так как коэффициент безопасности должен быть больше 1. Однако до последнего времени наиболее часто используются методики, позволяющие создавать одиночные импульсы в форме полуволны синусоиды [1; 2; 5; 6].

При формировании необходимых УСУ при испытаниях требуются специализированные ударные стенды, обеспечивающие длительность ударного импульса $\sim 0,1\text{--}0,3$ мс (при замене УСУ одиночным импульсом) и амплитудой до 3–5 тыс.г. Формировать ударные воздействия с уровнями до 1000 г по УСУ можно с применением электродинамических стендов, а для воздействий с большими уровнями – только с помощью специализированных ударных стендов (должны использоваться стенды с пиротехническими элементами) [17; 18].

Таким образом, рассмотрев вышеизложенный материал, можно сделать следующие выводы.

1. Уровни механических нагрузок на бортовую аппаратуру КА негерметичного исполнения в десятки раз могут превышать воздействия, принятые на основе стандартов для герметичных КА.

2. Нормирование нагрузок на бортовую аппаратуру КА должно проводиться на основе зонного нормирования по результатам измерений, полученных на различных этапах отработки и испытаний КА.

3. Обязательными видами испытаний для аппаратуры являются испытания на случайную вибрацию и ударные воздействия по методу ударных спектров ускорений.

4. До начала испытаний для всей БА должен проводиться механический анализ, на основе которого формируется необходимый объем испытаний.

5. Некорректное использование формул, связывающих между собой режимы испытаний на широкополосную случайную вибрацию и гармоническую вибрацию, приводит к необоснованному завышению режимов нагружения аппаратуры.

6. Корректировка входного воздействия: процедура «вырезания» (notching) допустима только в пределах коэффициента квалификации.

7. В процессе испытаний на ударные воздействия необходимо учитывать источники и «физику» ударных воздействий.

8. При автономных испытаниях аппаратуры на высокоинтенсивные ударные воздействия (УСУ больше 1000 г) рекомендуется использовать стенды с пиротехническими элементами.

Библиографические ссылки

1. Product verification requirements for launch, upper-stage and space vehicles. MIL-STD-1540D, 15 January, 1999.
2. Space engineering. Testing. ECSS-E10-03A, 15 02 2002.
3. Гладкий В. Ф. Прочность, вибрация и надежность конструкции летательного аппарата. М. : Наука, 1975.
4. Орлов С. А. Разработка методик нормирования и испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические нагрузки участка выведения. // Научный вестник НГТУ. № 3 (44). Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. С. 137-148.
5. Spacebus. Mechanical and thermal design, interfaces and environmental requirements. SB.AS.SY.002.AD02. P. 2.
6. ГОСТ Р 53190. Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра. М. : Стандартинформ, 2009.
7. Ленк А., Ренитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов. М. : Мир, 1976.
8. Wijker J. J. Random Vibrations in Spacecraft Structures Design: Theory and Applications //, New York : Springer. APA Citation. 2009.
9. ANSYS 10. Documentation Theory Reference.
10. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М. : ДМК Пресс, 2001.
11. MSC/DYTRAN User's Manual // The MacNeal-Schwendler Corporation, 1997.
12. Babuska I., Oden J. T. The Reliability of Computer predictions: can they be trusted? International Journal of numerical Analysis and Modeling, Vol. 1. № 1. 2005. P. 1–18.
13. Babuska I., Oden J. T. Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering. Eng. 193 (2004). P. 4057–4066.
14. Girard N., Roy A. Calvi Notching in Sine Testing : Understanding and Practice. Proc. '12th European Conference on Spacecraft Structures, Materials & Environmental Testing', Noordwijk, The Netherlands (ESA SP-691, July 2012).
15. Moreau D. Test Requirements for Space Equipment. Developed by ESA-ESRIN ID/D.
16. Испытательная техника. Справочник в 2 т. / под ред. В. В. Клюева. Т. 1. М. : Машиностроение, 1982.
17. Pyroshock test criteria. NASA-STD-7003. 1999. May 18.
18. Пат. 2394217 РФ, МПК G01M 7/08. Пиротехническое устройство для создания ударных воздействий / Орлов С. А., Орлов А. С. Оpubл. 10.07.2010. Бюл. № 19.

© Орлов С. А., Копытов В. И., 2013

УДК 621.396.677.3

СПОСОБ НАСТРОЙКИ АДАПТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ ГЛОНАСС

В. Н. Тяпкин^{1,2}, Д. Д. Дмитриев¹, А. В. Соколовский³, А. С. Першин³¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: tyapkin58@mail.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

³ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: pershin802@mail.ru

Рассмотрена адаптивная фазированная антенная решетка с исходным равномерным амплитудным распределением и определена эффективность алгоритма ее адаптации с применением базиса в виде частичного экспоненциального ряда Фурье по сравнению с оптимальным алгоритмом.

Ключевые слова: адаптивная фазированная антенная решетка, парциальная диаграмма направленности, равномерное амплитудное распределение.

TECHNIQUE FOR TUNING OF ADAPTIVE PHASED ANTENNA ARRAY OF NAVIGATION EQUIPMENT OF GLONASS CUSTOMER

V. N. Tyapkin^{1,2}, D. D. Dmitriev¹, A. V. Sokolovskiy³, A. S. Pershin³¹Siberian Federal University

26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: tyapkin58@mail.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia

³JSC "Academician F. M. Reshetnev "Information Satellite Systems"

52, Lenin street, Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: pershin802@mail.ru

The authors consider an adaptive phased antenna array with original equal amplitude distribution and appreciate the efficiency of the algorithm of its adaptation with the use of the basis in the form of partial basis of exponential Fourier series in comparison with the optimal algorithm.

Keywords: adaptive phased antenna array, partial directional pattern, equal amplitude distribution.

В современных условиях все большее значение приобретают средства спутниковой радионавигации (СРНС) как высокоточное навигационное средство глобальной доступности. Широкое применение СРНС находят для решения задач временной синхронизации, определения географических координат и пространственной ориентации не только в стандартной точности, гарантированной СРНС, но в таких приложениях, как геодезия, обеспечение посадки воздушных судов, измерение деформаций протяженных объектов. Подобные приложения спутниковой радионавигации требуют определения навигационных параметров с погрешностью не более единиц сантиметров [1].

В целях увеличения точности СРНС ГЛОНАСС происходит развертывание сети беззапросных измерительных станций (БИС). При этом БИС должна обеспечивать непрерывное высокоточное измерение радионавигационных параметров в условиях существования естественных и искусственных радиопомех.

Для повышения помехоустойчивости используется комплекс мер: пространственная селекция на основе применения как адаптивных фазированных антенных решеток (АФАР), так и антенных компенсаторов с помех; фильтрация в частотной и/или во временной областях; поляризационная селекция. И наиболее

бурно развивающимся направлением борьбы с активными помехами является пространственная селекция с использованием АФАР. При этом как коэффициент подавления помехи, так и точность определения радионавигационных параметров в процессе адаптации во многом зависят от исходного амплитудного распределения АФАР и применяемого алгоритма адаптации [2].

Рассмотрим формирование диаграммы направленности (ДН) в N -элементной линейной эквидистантной АФАР при исходном равномерном амплитудном распределении при воздействии помехового сигнала.

Результирующий отклик АФАР f_p в стационарном режиме в направлении u -го мешающего сигнала имеет вид

$$Y_{\Sigma} = x_u \sum_i a_i e^{ji\varphi_u} = x_u \sum \left[1 - \sum_{r=1}^R a_r e^{-jri\varphi_o} \right] \cdot e^{ji\varphi_u} =$$

$$= x_u f_o(\varphi_u) - x_u \sum_{r=1}^R a_r f_r(\varphi_u),$$

или

$$f_p(\varphi_u) = \frac{Y_{\Sigma}(\varphi_u)}{x_u} = f_o(\varphi_u) - \sum_{r=1}^R a_r f_r(\varphi_u), \quad (1)$$

где $f_0(\varphi_u)$ – исходное амплитудное распределение; $f_r(\varphi_u)$ – амплитудное распределение парциальных ДН.

Таким образом, результирующая ДН $f_r(\varphi_u)$ представляет собой суперпозицию исходной ДН, соответствующей исходному равномерному амплитудному распределению:

$$f_r(\varphi_u) = \sum_i e^{ji\varphi_u}, \quad (2)$$

и R парциальных ДН $f_r(\varphi_u)$ с весами a_r :

$$f_r(\varphi_u) = \sum_i e^{ji(\varphi_u - r\varphi_0)} = f_0(\varphi_u - r\varphi_0). \quad (3)$$

В тех местах, где исходная ДН $f_0(\varphi_u)$ имеет нули, парциальные ДН $f_r(\varphi)$ имеют максимумы (рис. 1), а в точке $\varphi = 0$ все парциальные ДН равны нулю, т. е. парциальные ДН являются ортогональными по отношению к исходной. Поэтому полезный сигнал, приходящий с главного направления, при адаптации не подавляется. Из уравнения (1) следует, что значение результирующей ДН в главном направлении равно значению исходной ДН в этом направлении: $f_r(0) = f_0(0)$.

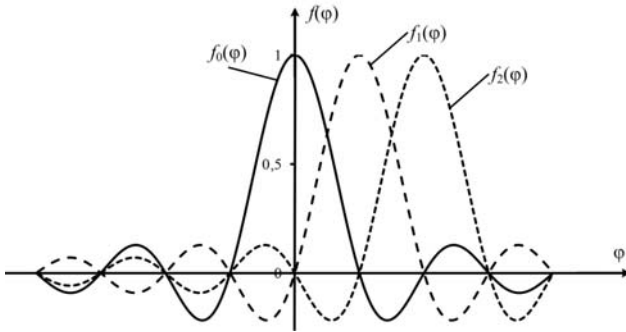


Рис. 1. Исходная и парциальные ДН

В подавлении помехи, приходящей по центру первого бокового лепестка $\varphi_u = 1,5 \cdot \varphi_0$ (см. рис. 1), будут, в основном, участвовать парциальные ДН с номерами $r = 1$ и $r = 2$. Остальные парциальные ДН в подавлении этой помехи могут участвовать только своими боковыми лепестками. Следовательно, их вклад в подавление малоэффективен, но именно эти парциальные ДН вызывают возмущения ДН в области остальных боковых лепестков. Если же, например, в подавлении помехи в центре первого бокового лепестка будут участвовать только две первых парциальных ДН, то главным образом искажен будет участок ДН от центра до третьего бокового лепестка, поскольку на этот участок воздействуют главные лепестки первой и второй парциальных ДН. В остальных боковых лепестках следует ожидать существенно меньших возмущений, поскольку боковые лепестки первой и второй парциальных ДН частично компенсируют друг друга в этих областях.

Исходя из вышеизложенного, важно оценить эффективность рассматриваемого алгоритма в случае представления амплитудного распределения частичным рядом Фурье, когда $R < N - 1$.

Пусть $R = 1$, и в целях адаптации используется r -й член разложения. Степень подавления помехи Q в этом случае рассчитываем по формуле

$$Q = \frac{1}{1 + \frac{Nx_u^2}{P_{\text{ш}}} f_{Hr}^2(\varphi_u)}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ш}}$ – мощность собственного шума в канале решетки; $f_{Hr}(\varphi_u) = \frac{1}{N} \sum_i e^{ji(\varphi_u - r\varphi_0)}$.

Единственный коэффициент разложения в этом случае может быть выполнен по следующей формуле (без учета влияния собственных шумов):

$$a_r = \frac{f_{H0}(\varphi_u)}{f_{Hr}(\varphi_u)}. \quad (5)$$

Собственный выходной шум в решетке для этой ситуации определяется соотношением

$$P_{\Sigma\text{ш}} = NP_{\text{ш}} \left[1 + \frac{f_{H0}^2(\varphi_u)}{f_{Hr}^2(\varphi_u)} \right], \quad (6)$$

$$\frac{P_{\Sigma\text{ш}}}{NP_{\text{ш}}} = 1 + \frac{f_{H0}^2(\varphi_u)}{f_{Hr}^2(\varphi_u)}. \quad (7)$$

Если в целях подавления помехи используются две парциальных ДН, соответствующих r_1 и r_2 членам разложения, показатели качества адаптации могут быть рассчитаны по выражениям:

$$Q_{r_1 r_2} = \frac{1}{1 + \frac{Nx_u^2}{P_{\text{ш}}} [f_{Hr_1}^2(\varphi_u) + f_{Hr_2}^2(\varphi_u)]}, \quad (8)$$

$$\frac{P_{\Sigma\text{ш}}}{NP_{\text{ш}}} = 1 + \frac{f_{H0}^2(\varphi_u)}{f_{Hr_1}^2(\varphi_u) + f_{Hr_2}^2(\varphi_u)}. \quad (9)$$

Сравнивая выражения для степени подавления помехи Q , определяемые соотношениями (4) и (8), с $Q_{\text{опт}}$ для оптимального алгоритма [3], найдем, что при $N \gg 1$ они отличаются отклонением от 1 множителя:

$$D_{rH}^2 = \begin{cases} f_{Hr}^2(\varphi_u), & R = 1, \\ f_{Hr_1}^2(\varphi_u) + f_{Hr_2}^2(\varphi_u), & R = 2. \end{cases} \quad (10)$$

Направления прихода помех φ_u на рис. 2, 3 соответствуют центрам трех первых боковых лепестков $1,5 \cdot \varphi_0, 2,5 \cdot \varphi_0, 3,5 \cdot \varphi_0$.

Проанализировав графики, сформулируем следующие выводы:

1. Приведенный алгоритм позволяет осуществлять адаптивное подавление помех в N -элементной линейной антенной решетке, используя только одну следящую систему (амплитудное распределение представляется рядом Фурье с одним ненулевым членом разложения). Степень подавления помехи в случае удачного выбора номера члена разложения относительно оптимального значения можно определить, исходя из данных соображений. В случае, когда $x_u^2 \gg P_{\text{ш}}$ и $N \gg 1$:

$$\frac{Q_{\text{опт}}}{Q} = D_{rH}^2(\varphi_u). \quad (11)$$

При $\varphi_u = 1,5 \cdot \varphi_0$ и $r = 1$ или $r = 2$, $D_{rH}^2 = 0,4$, т. е. степень подавления одиночной помехи в случае удачного выбора номера члена разложения амплитудного распределения ориентировочно на 60 % ниже максимально возможной при использовании оптимального алгоритма. Используя две соседние парциальные ДН для снижения бокового лепестка исходной ДН, можно существенно повысить степень подавления помехи. Если, например, помеха проходит по центру первого бокового лепестка $\varphi_u = 1,5 \cdot \varphi_0$, использование первых двух членов разложения с номерами 1 и 2 позволяет достичь степени подавления помехи ориентировочно на 20 % меньше, чем при использовании оптимального алгоритма или синтезированного алгоритма с $N - 1$ членами разложения.

2. Выходной шум минимален при использовании всех членов разложения, т. е. при $R = N - 1$. Если применять для подавления помехи только две парциальные ДН, которые накрывают прикрываемый боковой лепесток исходной ДН своими главными лепестками, то выходной шум увеличивается, по сравнению с NP_{III} , незначительно (не более чем на 5 %).

Результаты моделирования адаптивных алгоритмов приведены на рис. 4–9. Начальные условия: количество элементов в решетке $N = 8$, отношение помеха/шум равно 30 дБ, углы прихода помех $\varphi_{u1} = 1,5 \cdot \varphi_0$ (центр первого бокового лепестка) и $\varphi_{u2} = 2,5 \cdot \varphi_0$ (центр второго бокового лепестка). Штриховой линией изображена исходная ДН, сплошной – результирующая ДН после завершения процесса адаптации.

Для оценки флюктуаций ДН при нестационарной пространственной фильтрации активных помех в каждом периоде повторения по результатам моделирования были построены графики величины межпериодных флюктуаций ДН:

$$\gamma(\varphi) = 20 \lg \frac{|f(\varphi, t + T_{\text{адап}})|}{|f(\varphi, t)|}, \quad (12)$$

где $f(\varphi, t)$, $f(\varphi, t + T_{\text{адап}})$ – значения результирующей ДН в соседних периодах адаптации, которые опреде-

ляются динамикой помеховой обстановки. Алгоритму, в котором для подавления двух помех использовались два первых парциала ($R = 2$, $r_1 = 1$, $r_2 = 2$) соответствует рис. 4. Видно, что в направлении источников помех сформировались узкие провалы. Выигрыш в отношении сигнал / шум + помеха (ОСШП) составил 18,1 дБ. Коэффициент чувствительности к ошибкам АФАР незначительно увеличивается: от $S_0 = 0,125$ до $S = 0,149$. Изменение величины флюктуаций ДН (рис. 5) показывает, что в результате адаптации все боковые лепестки ДН подвергаются возмущениям.

В области $3 \dots N-2$ боковых лепестков изменение величины межпериодных флюктуаций имеет монотонный характер, и эта величина увеличивается от –12 до 0 дБ. В области главного лепестка величина флюктуаций плавно изменяется от 0 до 36 дБ. Заметим, что при подавлении помех не использовалась третья парциальная ДН, которая бы подавляла помехи во втором боковом лепестке исходной ДН своим главным лепестком.

Результаты выполнения алгоритма при $R = 3$ ($r_1 = 1$, $r_2 = 2$, $r_3 = 3$) приведены на рис. 6. По сравнению с предыдущим алгоритмом картина существенно изменяется.

Первый боковой лепесток сильно сужается, его уровень снижается с –13,5 до –52 дБ. В направлениях помех сформировались узкие провалы. Выигрыш в ОСШП составил 18,4 дБ. Коэффициент чувствительности к ошибкам АФР незначительно увеличивается от $S_0 = 0,125$ до $S = 0,137$. Изменение величины межпериодных флюктуаций ДН (рис. 7) показывает, что сильным возмущениям подвергаются только три первых боковых лепестка.

В области $4 \dots N-2$ боковых лепестков величина межпериодных флюктуаций практически равна нулю. Главный лепесток в пределах половинной мощности флюктуациям не подвергается. Если к трем первым парциальным ДН добавить четвертый $R = 4$ ($r_1 = 1$, $r_2 = 2$, $r_3 = 3$, $r_4 = 4$), результирующая ДН изменяется (рис. 8).

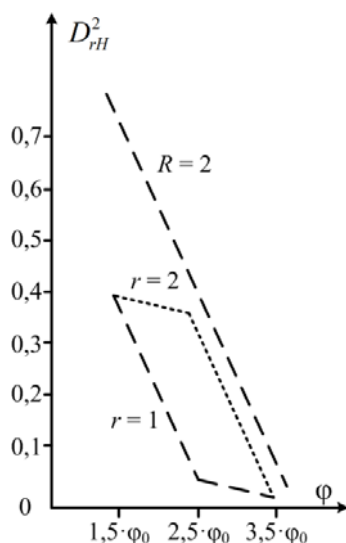


Рис. 2. Графики зависимости D_{rH}^2

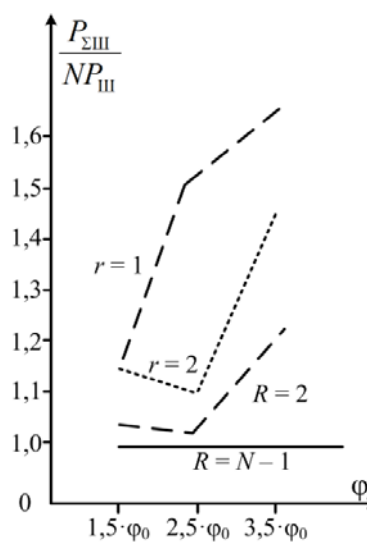


Рис. 3. Графики зависимости $\frac{P_{\Sigma III}}{NP_{III}}$

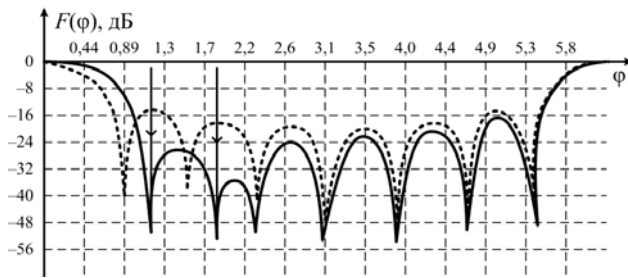


Рис. 4. ДН антенной решетки (частичный ряд Фурье, $R = 2$)

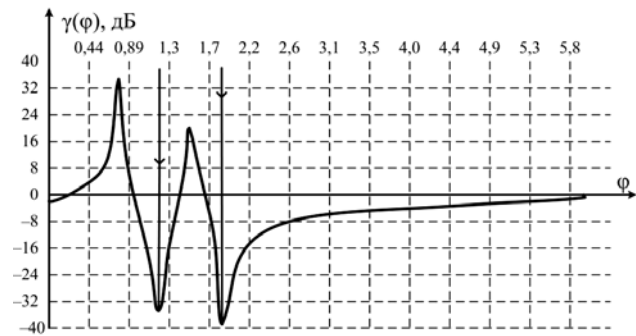


Рис. 5. График изменения коэффициента межпериодных флюктуаций ДН (частичный ряд Фурье, $R = 2$)

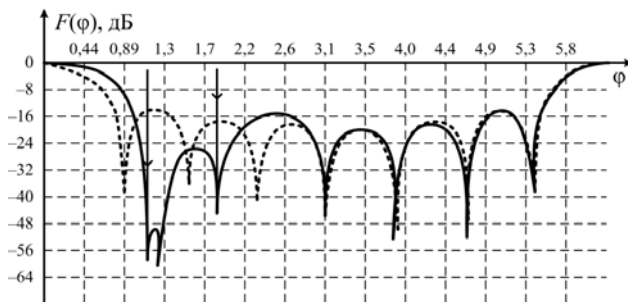


Рис. 6. ДН антенной решетки (частичный ряд Фурье, $R = 3$)

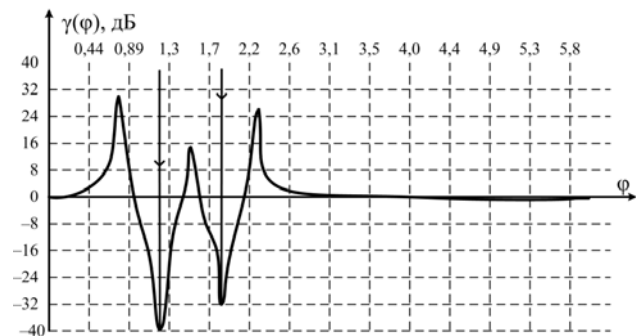


Рис. 7. График изменения коэффициента межпериодных флюктуаций ДН (частичный ряд Фурье, $R = 3$)

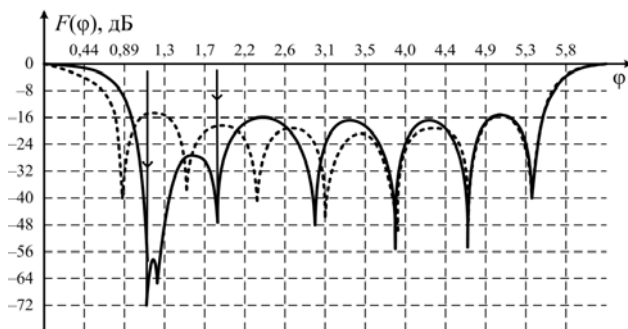


Рис. 8. ДН антенной решетки (частичный ряд Фурье, $R = 4$)

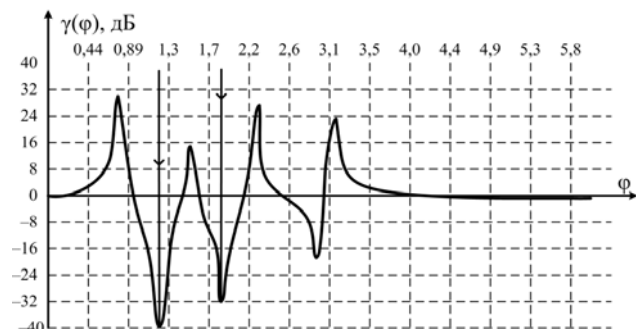


Рис. 9. График изменения коэффициента межпериодных флюктуаций ДН (частичный ряд Фурье, $R = 4$)

Первый боковой лепесток еще больше сужается и опускается до -59 дБ. Выигрыш в ОСШП составляет $18,4$ дБ. Коэффициент чувствительности к ошибкам АФАР незначительно увеличивается от $S_0 = 0,125$ до $S = 0,136$. Изменение величины межпериодных флюктуаций ДН (рис. 9) показывает наличие сильных возмущений ДН в области 3 и 4 боковых лепестков (от -20 до 28 дБ).

В области остальных боковых лепестков величина межпериодных флюктуаций практически равна нулю. Главный лепесток в пределах половинной мощности флюктуациям не подвергается.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) использование в целях адаптации тех парциальных ДН, которые принимают участие в подавлении помех только своими боковыми лепестками, нецеле-

сообразно, поскольку реально ощутимого выигрыша в ОСШП они не дают (десятые доли дБ), но вызывают глубокие межпериодные флюктуации ДН, при этом величина флюктуаций может изменяться в пределах от минус 33 до 32 дБ в областях боковых лепестков исходной ДН, свободных от помех;

2) для достижения выигрыша в ОСШП, близкого к оптимальному значению, целесообразно использовать алгоритм, в котором амплитудное распределение представлено частичным экспоненциальным рядом Фурье. Члены этого ряда соответствуют парциальным ДН, принимающим участие в подавлении помех своими главными лепестками. При этом потери в ОСШП по сравнению с оптимальным значением составляют десятые доли дБ, а межпериодные флюктуации ДН минимальны. Сильным искажениям подвергаются подавляемые и соседние боковые лепестки.

В области остальных боковых лепестков величина флюктуаций практически равна нулю;

3) амплитудное распределение частичным экспоненциальным рядом не приводит к существенному увеличению коэффициента чувствительности к ошибкам АФАР по сравнению со случаем использования полного ряда. Потери составляют десятые доли дБ.

Библиографические ссылки

1. Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Мошкина Т. Г. Потенциальная помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавига-

ционных систем // Вестник СибГАУ. 2012. № 3 (43). С. 113–119.

2. Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС : монография : Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2012.

3. Пистолькорс А. А., Литвинов О. С. Введение в теорию адаптивных антенн. М. : Наука, 1991.

© Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Соколовский А. В., Першин А. С., 2013

УДК 629.7/621.01

МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ

Е. А. Фурманова, О. Г. Бойко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: bouko1962@yandex.ru

Рассмотрен метод расчета надежности систем с учетом восстановления. Показана структура формирования математической модели времени до совместного отказа в восстанавливаемой системе одновременно двух и трех агрегатов.

Ключевые слова: время до отказа, цикл восстановления, число циклов, вероятность отказа.

AIRPLANES FUNCTIONAL SYSTEMS RELIABILITY CALCULATION METHOD

Е. А. Furmanova, O. G. Boyko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: bouko1962@yandex.ru

The authors consider a method for systems reliability calculation, with allowance for recovery, and show the structure of formation of mathematical model of time, until simultaneous failure of two and three aggregates in a recoverable system.

Key words: time until failure, recovery, number of cycles, failure probability.

Расчету надежности систем самолетов без учета и с учетом восстановления посвящены работы [1–5]. Методы расчета систем в указанных работах основываются на методологическом подходе, в котором не используется теорема умножения вероятностей. Основу этого подхода составляет предположение о том, что вероятность отказа агрегата в системе определяется суммарным параметром потока отказов агрегатов ω_{Σ} , составляющих систему, и наработкой.

Поскольку системы самолетов являются восстанавливаемыми системами, то при стационарном процессе эксплуатации наработка на отказ агрегатов стабилизируется, и в качестве математической модели вероятности отказов агрегатов может быть принято распределение равномерной плотности [6]:

$$q(t) = \omega t, \quad (1)$$

где $0 \leq t \leq \frac{1}{\omega}$.

В соответствии с принятым методологическим подходом и уравнением (1), вероятность отказа первого агрегата $q_1(t)$ в невосстанавливаемой системе общего резервирования определится по выражению

$$q_1(t) = \omega_{\Sigma} t_1 = n \cdot m \cdot \omega \cdot t_1, \quad (2)$$

где n – количество последовательно соединенных агрегатов в подсистеме; m – количество параллельно соединенных подсистем.

Рассмотрим систему общего резервирования при $n = 20$ и $m = 3$. Такая система будет подобна структуре гидросистемы самолета Ту-154М, содержащей три одинаковых подсистемы общего резервирования.

Положив в формуле (2) $q_1(t) = 1$, определим время до отказа первого агрегата в системе:

$$t_1 = \frac{1}{n \cdot m \cdot \omega}. \quad (3)$$

Тогда, с учетом наработки t_1 и изменения количе-

ства исправных подсистем найдем вероятность отказа второго агрегата в системе:

$$q_2(t) = n(m-1)\omega(t_1 + \Delta t_2). \quad (4)$$

Положив в формуле (4) $q_2(t) = 1$, рассчитаем приращение времени между первым и вторым отказами в виде

$$\Delta t_2 = \frac{1 - n(m-1)\omega \cdot t_1}{n(m-1)\omega}. \quad (5)$$

Продолжая подобную процедуру, определим приращение времени между отказами второго и третьего агрегатов в системе:

$$\Delta t_3 = \frac{1 - n(m-2)\omega(t_1 + \Delta t_2)}{n(m-2)\omega}. \quad (6)$$

Значения времени t_1 , Δt_2 и Δt_3 необходимы для последующего расчета надежности системы с учетом восстановления.

В [3–5] разработан метод расчета надежности систем с учетом восстановления. В предлагаемой работе рассмотрена иная структура построения решения, с использованием той же методологии, обеспечивающей получение равных, полученных в [3–5], количественных оценок надежности. По нашему мнению, предлагаемая процедура обеспечивает более простое для понимания представление о ходе решения задачи.

Как и в упомянутых работах, решение задачи построено на использовании стационарной части решения Марковской задачи об определении вероятностей нахождения функциональной системы в различных состояниях [7]. Функциональная система может находиться в исправном либо неисправном, но работоспособном состояниях с одним, либо с большим числом отказавших агрегатов. Вероятность нахождения системы в исправном состоянии в [3; 4] определена по выражению

$$P_{\text{испр}} = \frac{\mu}{\mu + \omega}, \quad (7)$$

где $\omega = a_{12}$ – интенсивность перехода системы из исправного состояния в неисправное, но работоспособное, либо в состояние отказа, определяемое в ходе решения задачи; μ – интенсивность восстановления – величина, обратная времени восстановления.

Для самолетов время восстановления $T_{\text{но}}$ принимается равным времени полета с отказом одного либо нескольких агрегатов в системе.

Интенсивность перехода системы из исправного состояния в состояние с одним отказавшим агрегатом определится временем до первого отказа t_1 агрегата в системе:

$$a_{12_1} = \frac{1}{t_1}. \quad (8)$$

Тогда формула вероятности нахождения системы в исправном состоянии, в соответствии с выражением (7), будет иметь вид

$$P_1^{\text{испр}} = \frac{\mu}{\mu + a_{12_1}}, \quad (9)$$

а вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии определится по выражению

$$P_1^{\text{раб}} = 1 - P_1^{\text{испр}}. \quad (10)$$

Второй отказ агрегата в системе, совместно с первым, может реализоваться только через некоторое число k_2 циклов отказов и восстановлений одного агрегата. Продолжительность каждого цикла τ является суммой времени t_1 и $T_{\text{но}}$:

$$\tau_2 = t_1 + T_{\text{но}}. \quad (11)$$

Число k_2 при стационарном процессе эксплуатации будет таким, чтобы сумма отрезков времени $T_{\text{но}}$ стала равной Δt_2 . Тогда k_2 можно выразить как

$$k_2 = \frac{\Delta t_2}{T_{\text{но}}}. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что, в соответствие с практикой, всегда существует вероятность реализации одновременно двух отказов до восстановления первого отказавшего агрегата. При этом время работы восстанавливаемой системы до момента одновременного отказа в ней двух агрегатов вычисляется по формуле

$$t_2^{\text{вост}} = (t_1 + T_{\text{но}}) \frac{\Delta t_2}{T_{\text{но}}}. \quad (13)$$

Время $t_2^{\text{вост}}$ определит интенсивность перехода системы из исправного состояния в работоспособное с двумя одновременно отказавшими агрегатами:

$$a_{12_2} = \frac{1}{t_2^{\text{вост}}}. \quad (14)$$

Тогда вероятность нахождения системы в исправном состоянии будет выражено как

$$P_2^{\text{испр}} = \frac{\mu}{\mu + a_{12_2}}, \quad (15)$$

и вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии с двумя отказавшими агрегатами будет рассчитываться по уравнению

$$P_2^{\text{раб}} = 1 - P_2^{\text{испр}}. \quad (16)$$

Одновременный отказ в системе трех агрегатов может реализоваться через k_3 циклов отказов и восстановлений одного и одновременно двух агрегатов. Продолжительность одного такого цикла будет вычислена по формуле

$$\tau_3 = t_2^{\text{вост}} + T_{\text{но}}, \quad (17)$$

а число таких циклов будет найдено по выражению

$$k_3 = \frac{\Delta t_3}{T_{\text{но}}}. \quad (18)$$

Тогда определим время работы восстанавливаемой системы до момента одновременного отказа в ней трех агрегатов:

$$t_3^{\text{вост}} = [(t_1 + T_{\text{но}}) \frac{\Delta t_2}{T_{\text{но}}} + T_{\text{но}}] \frac{\Delta t_3}{T_{\text{но}}}. \quad (19)$$

По аналогии с (8), (14) и (15), найдем

$$a_{12_3} = \frac{1}{t_3^{\text{вос}}}; \quad (20)$$

$$P_3^{\text{испр}} = \frac{\mu}{\mu + a_{12_3}}. \quad (21)$$

Но рассматриваемая система, после отказа в ней одновременно трех агрегатов, перейдет в состояние отказа с вероятностью

$$Q(t_3^{\text{вос}}) = 1 - P_3^{\text{испр}}. \quad (22)$$

При этом вероятность отказа системы за 1 час полета рассчитаем в соответствии с (19) и (22):

$$Q(1) = \frac{Q(t_3^{\text{вос}})}{t_3^{\text{вос}}}. \quad (23)$$

Из выражения (13) и (19) следует, что первоначальный цикл восстановления одного отказавшего агрегата $(t_1 + T_{\text{по}})$ с момента t_1 до момента одновременного отказа двух агрегатов повторится k_2 раз. С момента t_1 до одновременного отказа трех агрегатов этот цикл $(t_1 + T_{\text{по}})$ повторится $(k_2 k_3)$ раз. Кроме того, из выражения (19) очевидно, что при мгновенном восстановлении отказывающих агрегатов $T_{\text{по}} = 0$, следует, что $t_3^{\text{вос}} = \infty$, $a_{12_3} = 0$ и $P^{\text{испр}} = 1$, т. е. система становится безотказной. Напротив, с увеличением $T_{\text{по}}$ надежность системы интенсивно убывает.

Например, для рассматриваемой системы – аналога гидросистемы самолета Ту-154М – при $n = 20$, $m = 3$, $\omega = 1 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, без учета восстановления, получены следующие значения: время полета до отказа первого агрегата $t_1 = 166,6 \text{ ч}$, приращения времени $\Delta t_2 = 83 \text{ ч}$ и $\Delta t_3 = 250 \text{ ч}$. При учете восстановления и $T_{\text{по}} = 1$, число циклов восстановления будет $k_2 = 83$ и $k_3 = 250$. Время до отказа одновременно двух агрегатов, при вероятности такого события, вычисленного по выражению (16), составит $t_2^{\text{вос}} = 13911 \text{ ч}$. Время до одновременного отказа трех агрегатов с вероятностью, определенной по (22), $t_3^{\text{вос}} = 3477700 \text{ ч}$.

Таким образом, предлагаемый метод дает возможность наглядно представить изменения вероятностей

отказа одного и более агрегатов и время до их отказов в восстанавливаемой системе.

Библиографические ссылки

1. Бойко О. Г. Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации: монография. РАН. М., 2009.
2. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Методологические основы и методы подтверждения соответствия сертификационным требованиям к надежности функциональных систем самолетов // Авиационные и ракетно-космические технологии «АКТО-2012»: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Т. 4 (Казань, 14–17 августа 2012 г.) Казань: Изд-во Казан. национ. иссл. техн. ун-та, 2012. С. 389–399.
3. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Новый подход в оценке надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем Казань: Казань–Дайтона Бич. 2012. № 2 (35). Т. 17. С. 21–27.
4. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г., Фурманова Е. А. Метод расчета надежности восстанавливаемых систем с общим резервированием // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники: материалы VII Всерос. науч. конф., посвящ. памяти главного конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. С. 223–227.
5. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Исследование методологических подходов к расчету надежности систем с позиций фундаментальных представлений статистической физики // Безопасность и живучесть технических систем: материалы IV Всерос. конф. Т. 1. Красноярск: ИФ СО РАН. 2012. С. 229–234.
6. Венцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Физматлит, М.: 1962.
7. Емелин Н. М. Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов / Н. М. Емелин. М.: Машиностроение, 1995.

© Фурманова Е. А., Бойко О. Г., 2013

РАЗДЕЛ
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

УДК 62-24

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАШИНЫ УДАЛЕНИЯ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ С ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СЛИТКА

Д. В. Вавилов¹, Е. Е. Новиков²

¹Сибирский федеральный университет
Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: vavilov@krasec.com
²ООО «Красноярская Инжиниринговая Компания»
660111, г. Красноярск, ул. Башиловская, 2, оф. 118. E-mail: eganee@mail.ru

Представлены результаты моделирования напряженно деформированного анализа машины удаления оксидной пленки с поверхности алюминиевого слитка. Представленная методика анализа может быть использована для анализа напряженно деформированного состояния рабочих органов машин, работающих при высоких температурах методом конечных элементов.

Ключевые слова: моделирование, теплопередача, нестационарный теплообмен.

RESEARCH OF STRESS-STRAIN CONDITION OF WORKING BODY OF THE MACHINE FOR REMOVAL OF OXIDE FILM FROM SURFACES OF ALUMINIUM INGOTS

D. V. Vavilov, E. E. Novikov²

¹Siberian Federal University
26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: vavilov@krasec.com
LLC "Krasnoyarsk Engineering Company"
Office 118, 2 Bashilovskaya Street, Russia, 660111, Krasnoyarsk. E-mail: eganee@mail.ru

In the work the authors present the results of stress-state simulations analysis of the machine for removal of oxide film from surfaces of aluminium ingots. The presented technique of analysis can be used for analysis of stress-strain states of working bodies of machines, operating at high temperatures, by the method of finite elements.

Keywords: numeric simulation, thermal conductivity, transient thermal analyze.

Обеспечение качества выходной продукции при производстве малого алюминия – одна из ключевых задач освоения новых рынков. Наиболее остро стоит проблема образования трещины в центре слитка при усадке. Одна из причин возникновения дефекта при литье – это усадочные раковины и так называемые неметаллические включения (шлак), которые присутствуют на поверхности слитка после его кристаллизации.

Удаление неметаллических включений производится с поверхности слитка в литейной изложнице сразу после заполнения ее жидким металлом, что кроме удаления шлака позволяет также обеспечить равномерное остывание слитка. Таким образом, решается сразу две проблемы: удаление шлака и минимизация образования усадочной раковины [1]. Авторским коллективом разработана конструкция автоматической машины для снятия оксидной пленки с поверхности алюминиевого слитка (рис. 1).

Рабочим органом в разработанной машине являются лопатки. Лопатки работают в агрессивной среде расплавленного алюминия и являются наиболее нагруженным элементом машины. Все приводные механизмы вынесены за пределы теплового воздействия жидкого алюминия.

Исследование напряженно-деформированного состояния рабочего органа машины удаления шлака с поверхности алюминиевой чушки позволит на этапе проектирования определить напряжения, возникающие под действием температурных нагрузок.

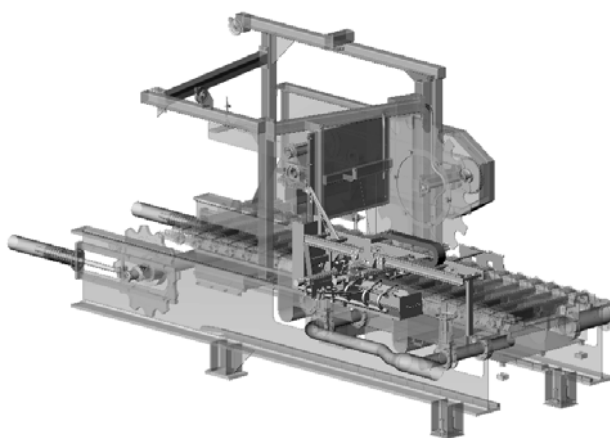


Рис. 1. Машина удаления оксидной пленки с поверхности алюминиевого слитка, установленная на литейном конвейере

Для исследования напряженно-деформированного состояния лопатки под действием тепловых нагрузок необходимо определить распределение температурных полей в теле лопатки.

Процесс теплопередачи в сплошной среде можно описать уравнением для скорости переноса тепла, которое еще называют законом Фурье [2]. Дифференциальная форма этого закона, выражающая плотность теплового потока в положительном направлении оси x , имеет вид

$$q'' = -k dT/dx. \quad (1)$$

В терминах теплового потока через поверхность A

$$q = -k A dT/dx. \quad (2)$$

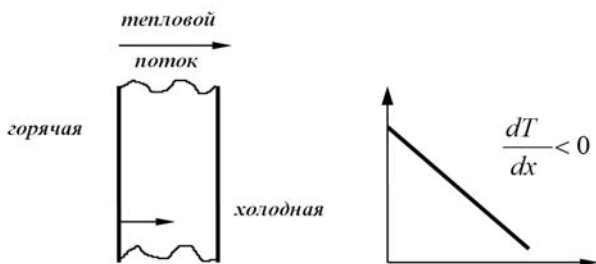


Рис. 2. Градиент теплового потока

Знак «минус» в уравнении указывает на то, что тепло передается в направлении меньшей температуры. Закон Фурье для трех направлений декартовой системы координат записывается следующим образом: в векторной форме для случая изотропной теплопроводности ($\mathbf{k} = k_x = k_y = k_z$) уравнение имеет вид

$$q'' = -k \nabla T, \text{ где} \quad (3)$$

$$q = q''_x i + q''_y j + q''_z k, \quad (4)$$

$$\nabla T = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}. \quad (5)$$

В качестве одного из граничных условий в конечно-элементных пакетах задается конвекция. Свободная конвекция происходит при движении среды вследствие разности плотностей нагретых и холодных слоев среды в поле тяжести. Примером является теплопередача от горячего тротуара к атмосферному воздуху в спокойный, безветренный день. Вынужденная конвекция обусловлена движением среды, которое вызвано некоторыми внешними причинами, такими как действие вентилятора, насоса или атмосферных ветров.

Согласно закону Ньютона теплопередача конвекцией описывается следующей формулой (6):

$$q'' = q / A = h(T_s - T_B), \quad (6)$$

где T_s – температура поверхности; T_B – средняя температура окружающей среды.

Конвективная теплопередача фактически является граничной, или поверхностной, нагрузкой. Конвекция может задаваться несколькими способами:

– вводом элемента конвективной связи (от узла к узлу);

– вводом двумерных и трехмерных элементов с поверхностным эффектом (от поверхности к узлу);

– вводом команд конвективной нагрузки, которые работают только с массивом твердотельных или оболочечных теплопроводящих элементов.

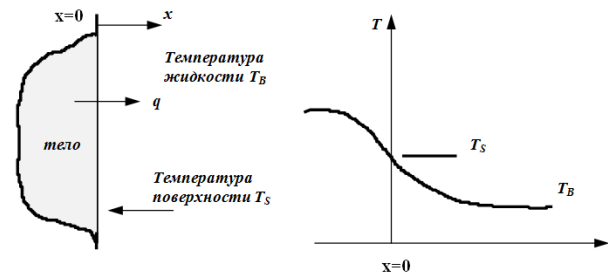


Рис. 3. Градиент теплового потока

Элементы с поверхностным эффектом задаются при моделировании конвекции «от поверхности к узлу», поскольку они содержат дополнительный узел (не принадлежащий базовому элементу), с помощью которого можно задавать среднюю температуру среды.

Нестационарный тепловой анализ рассматривает меняющийся во времени отклик системы, сопровождающийся процессами нагревания или охлаждения. В противоположность стационарному анализу можно видеть, что в этом случае происходит следующее:

- температуры изменяются со временем;
- тепловой поток изменяется со временем;
- тепловые нагрузки могут изменяться со временем;
- изменения внутренней энергии очевидны.

Основой для получения разрешающих уравнений является закон сохранения энергии.

Для некоторой сосредоточенной массы или элементарного объема количество подводимой энергии минус количество отводимой энергии равно изменению внутренней энергии, или в алгебраической форме

$$Q_{\text{подводимая}} + Q_{\text{генерируемая}} - Q_{\text{отводимая}} = Q_{\text{накопленная}}.$$

Для элементарного объема это соотношение в дифференциальной форме имеет вид:

$$\rho c \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot q'' = q''' \quad (7)$$

Используя закон Фурье, уравнение можно записать в таком развернутом виде:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q''' = \rho c \frac{dT}{dt}. \quad (8)$$

В соответствии с ранее указанной процедурой можно получить следующую систему уравнений:

$$[C] \{\dot{T}\} + [K] \{T\} = \{Q\}, \quad (9)$$

где $[K]$ = матрица теплопроводности; $[C]$ = матрица удельных теплоемкостей (или емкостей); $\{T\}$ = узловые температуры; $\{\dot{T}\}$ = производная температуры от времени $\{T\}$; $\{Q\}$ = вектор узлового теплового потока.

Для получения значений температуры $\{T\}$ используется следующий способ интегрирования по времени:

$$\{T_{n+1}\} - \{T_n\} = \Delta t_n (1 - \Theta) \{\dot{T}\} + \Delta t_n \Theta \{\dot{T}_{n+1}\}. \quad (10)$$

Этот прием известен как способ Эйлера (или метод трапеций) для интегрирования по времени. В данном случае $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ – шаг интегрирования по времени между точками n и $n + 1$; $\{T_n\}$, $\{T_{n+1}\}$ – значения температур в моменты времени n и $n + 1$; $\{\dot{T}_n\}$, $\{\dot{T}_{n+1}\}$ – производные температур; Θ – параметр Эйлера.

Величина параметра Θ определяет метод интегрирования по времени. В САЕ пакетах параметр Θ удовлетворяет соотношению $1/2 \leq \Theta \leq 1$. При $\Theta = 1/2$ имеет место схема интегрирования Кранка–Николсона, при $\Theta = 1$ – обратный метод Эйлера. Метод Кранка–Николсона также называют правилом средней точки, а обратный метод Эйлера – методом обратных разностей.

Когда используются указанные методы интегрирования по времени, система уравнений для нестационарной теплопроводности принимает вид:

$$[\bar{K}] \{\Delta T\} = \{Q\}, \quad (11)$$

где $\{\Delta T\} = \{T_{n+1}\} - \{T_n\}$; $[\bar{K}]$ – эквивалентная матрица теплопроводности, которая зависит от матрицы теплопроводности $[K]$ и удельной теплоемкости $[C]$; $\{Q\}$ – эквивалентный вектор теплового потока, учитывающий $\{Q\}$, $\{T_n\}$ и $\{\dot{T}_n\}$.

Конкретный вид указанных эквивалентных величин следующий:

$$[\bar{K}] = \frac{1}{\Theta \Delta t} [C] + [K], \quad (12)$$

$$\{Q\} = \{Q\} + \frac{1 - \Theta}{\Theta} [C] \{\dot{T}_n\} - [K] \{T_n\}. \quad (13)$$

Наиболее нагруженным элементом конструкции установки является рабочий орган – лопатка. Верхняя лопатка находится в контакте с металлом более продолжительное время, следовательно, более уязвима.

Для моделирования воздействия высоких температур на рабочий орган машины необходимо определить распределение температурного поля в лопатке при длительном контакте лопатки с жидким металлом. Также необходимо определить величину напряжений возникающих в лопатке под действием температурных нагрузок. Для решения вышеописанной задачи проведено моделирование нестационарного теплообмена.

Лопатки контактируют с металлом в самых неблагоприятных условиях не более 1 с затем 2 с они выходят из контакта и остывают в атмосфере. На рис. 4 показана диаграмма циклического изменения конвективной теплопередачи при контакте лопатки и алюминия. Величина конвективной теплоотдачи 210 Вт/м К получена экспериментальным путем [3].

В качестве свойств материала задано:

- теплопроводность: 60,5 Вт/м К;
- удельная теплоемкость: 434 Дж/кг К;
- коэффициент температурного расширения: $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$;
- модуль упругости: $2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$;
- коэффициент Пуассона: 0,28;
- плотность: 7 800 кг/м³;
- предел текучести: 240 МПа;
- предел прочности: 400 МПа.

Время моделирования нестационарного процесса 70 с.

В результате моделирования получены графики изменения температуры активной части лопатки во времени (рис. 5).

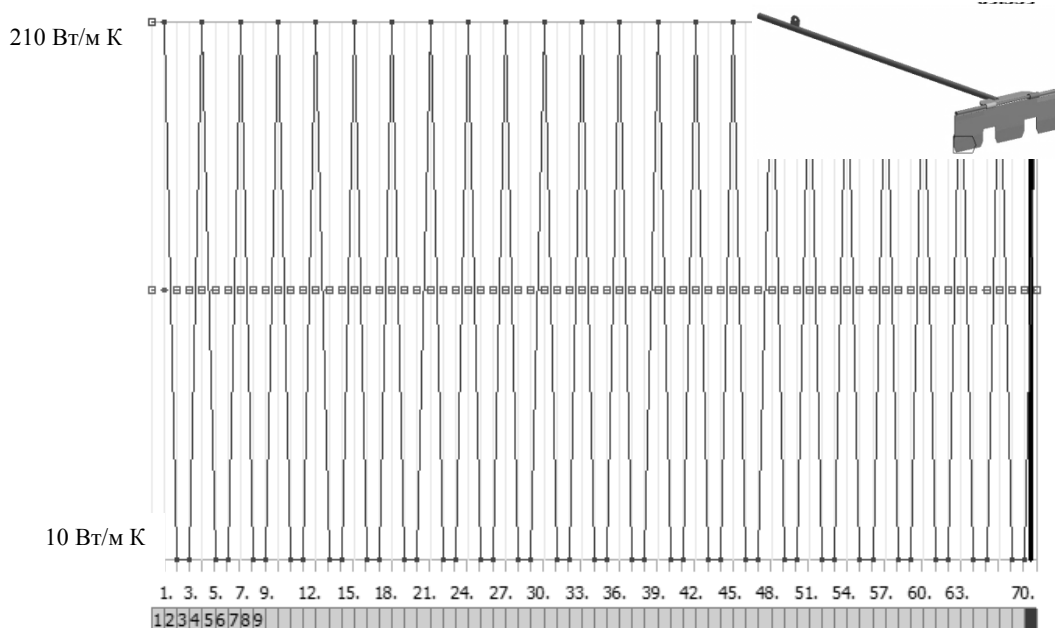


Рис. 4. График циклического изменения теплового потока

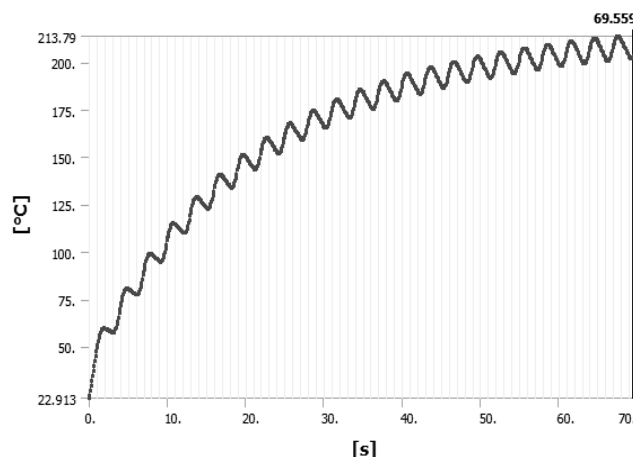


Рис. 5. График изменения температуры активной части лопатки

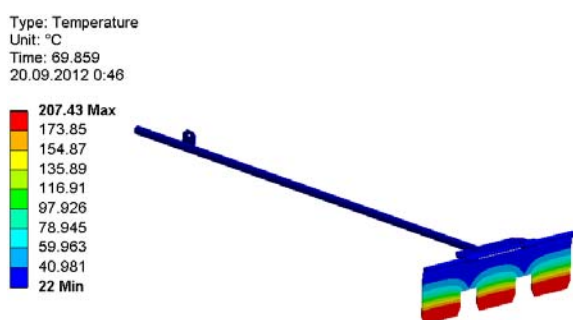


Рис. 6. Температура лопатки в конце моделирования

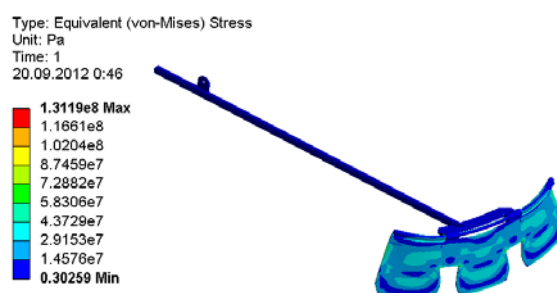


Рис. 7. Распределение напряжений в лопатке

В результате моделирования видно, что максимальная температура составляет 213 °С. При этом максимальное значение температуры асимптотически приближается к 220 °С. На рис. 6 представлено распределение температурного поля в теле лопатке.

Из рисунка видно, что высокие значения температур не распространяются за пределы лопатки.

Распределение напряжений в лопатке в конце процесса моделирования на 70 с показано на рис. 7. Высокий температурный градиент в лопатке формирует высокие напряжения, вызванные температурными деформациями.

Максимальные напряжения возникают в кронштейне крепления лопатки и составляют 130 МПа. Максимальные деформации модели составляют 0,58 мм. Полученная величина напряжений не является критичной для обеспечения заданной выносливости лопатки.

В заключении стоит отметить, что представленная методика расчета позволяет получить картину напряженно-деформированного состояния методом конеч-

ных элементов на этапе проектирования. В результате исследования напряженно-деформированного состояния рабочего органа машины удаления оксидной пленки с поверхности алюминия значения максимальных напряжений не превышают допустимых. В случае превышения допустимых напряжений данная методика позволяет оптимизировать геометрию изделия для достижения заданных характеристик.

Библиографические ссылки

1. Дубровин В. К. Повышение качества отливок из жаропрочных сплавов путем фильтрационной очистки // Вестник ЮУрГУ. 2008. № 24. С. 55–59.
2. Thermal modelling of ingot chain production / C. Sztur et al. // TMS Light Metals. 2001. P. 1099–1105.
3. Remelt ingot mold heat flow and deformation / J. Grandfield, D. Mortensen, H. Fjær et al. // TMS Light Metals. 2006. P. 869–876.

© Вавилов Д. В., Новиков Е. Е., 2013

КРИТЕРИИ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ОПТИМАЛЬНЫХ МАЛОПОЛЮСНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ МАШИН*

Е. А. Головенко, В. А. Горемыкин, Е. С. Кинев, И. С. Гудков, С. С. Бежитский

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: mgv@iss-reshetnev.ru

Проведен обзор подходов к конструированию малополюсных линейных индукционных машин металлургического назначения. Показаны критерии выбора конструктивных решений и схем включения машин, полученные на базе многовариантных расчетов и математического моделирования электромагнитных режимов в среде Ansys Multiphysics. Варианты приоритетных конструкций в ходе оптимизации соотнесены с областями предпочтительных геометрических размеров и технических параметров индукторов ЛИМ.

Ключевые слова: линейная индукционная машина, полюсный шаг, увеличенный рабочий зазор, численное моделирование, аналитические методы, оптимизационный алгоритм.

CHOICE CRITERIA OF CONSTRUCTIVE DECISIONS OPTIMUM LOW-POLAR LINEAR INDUCTION MACHINES

E. A. Golovenko, V. A. Goremykin, E. S. Kinev, I. S. Gudkov, S. S. Bezhitskiy

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: mgv@iss-reshetnev.ru

The review of approaches to designing of low-polar linear induction machines of metallurgical appointment is carried out. The choice criteria of constructive decisions and schemes of machine turning on, received on the basis of multiple calculations and mathematical modeling of electromagnetic modes in the environment of Ansys Multiphysics are shown. Variants of priority designs during optimization are correlated to areas of the preferable geometrical sizes and technical parameters of inductors LIM.

Keywords: the linear induction machine, the polar step, the increased working gap, numerical modeling, analytical methods, optimization algorithm.

Линейные индукционные машины (ЛИМ) применяются в металлургии для бесконтактного силового воздействия на расплавы металлов с целью их транспортировки, управления скоростью литья металла из миксеров и печей в кристаллизаторы, перемешивания с целью гомогенизации расплавов по химическому составу, температуре и других технических операций. Такое назначение ЛИМ определяет большую величину зазора между индуктором и рабочим телом, что вызвано необходимостью размещения между ними теплоизоляции. Значительные рабочие зазоры приводят к конструктивным особенностям, т. е. большим абсолютным величинам полюсных шагов и, как следствие, малому числу пар полюсов. Пульсирующая составляющая магнитного поля сопоставима с величиной бегущей [1]. Это вызывает проявление ярко выраженных поперечного и продольного краевых эффектов в рабочем теле. Усиливается влияние эффекта переноса мощности между фазами на работу машины. Перечисленные факторы обуславливают особые требования, предъявляемые к разработке ЛИМ металлургического назначения.

Индуктор плоской односторонней ЛИМ (рис. 1) состоит из ферромагнитного сердечника 1 и многофазной обмотки 2, расположенной в пазах сердечника. Создаваемое плоской ЛИМ бегущее магнитное поле пронизывает рабочее тело 3, оказывая на него силовое воздействие, принуждая его к движению со скоростью V_M [1].

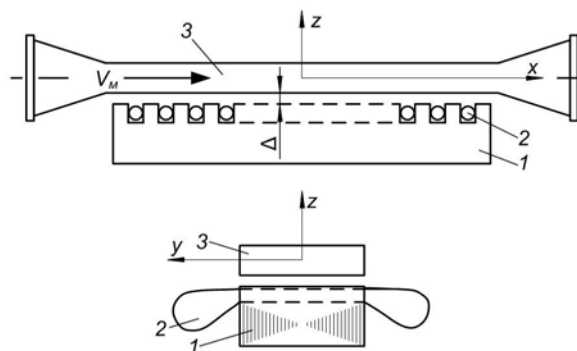


Рис. 1. Плоский индуктор ЛИМ с жидкометаллическим рабочим телом

* Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».

Вследствие большого зазора Δ между сердечником и рабочим телом рассеяние велико, магнитный поток в рабочем теле ослаблен. В плоских ЛИМ металлургического назначения, линейная токовая нагрузка намного выше, чем в классических электрических машинах вращения. Вместе с тем величина допустимой плотности тока ограничена вследствие сложных условий охлаждения обмоток. Поэтому необходимы мероприятия по увеличению площади паза, что неизбежно приводит к повышению пазового рассеяния.

Применение инженерных методик расчета плоских односторонних ЛИМ с увеличенным рабочим зазором, основанных на аналитических выражениях, приводит к большим погрешностям расчета. Как следствие, существующие сегодня плоские односторонние ЛИМ с увеличенным рабочим зазором, далеки от оптимального варианта с позиций энергетической эффективности. С появлением современных автоматизированных средств численного моделирования и параметрической оптимизации, а также средств автоматизации натурных исследований, появились возможности многовариантных расчетов плоских ЛИМ. Накопленный опыт и информационная база позволяют определить критерии и разработать рекомендации по созданию специальных машин оптимальной конструкции, для эксплуатации в литейных производствах металлургических предприятий.

В плоских ЛИМ более половины энергии, потребляемой индуктором, расходуется на компенсацию последствий пазового рассеяния. Кроме того, большой рабочий зазор приводит к заданию больших значений полюсного шага и, как следствие, малому числу полюсов. Из-за малого числа полюсов в машинах с разомкнутым магнитопроводом присутствует магнитное перераспределение мощностей между обмотками разных фаз. Эти факторы приводят к существенным особенностям расчета и проектирования плоских ЛИМ по сравнению с машинами вращения, но ограничивают число вариантов их исполнения.

Можно встретить разные конструктивные исполнения ЛИМ. Так, например, уже более полувека шведско-германский концерн АБВ использует индукторы ЛИМ с расщепленной фазой. Эта конструкция имеет двухфазную обмотку с одной полюсной парой на длину машины $2p = 2$. Аналогичные индукторы для сталеплавильных печей под названием «Статор электромагнитного перемешивания» (СЕП 2) в СССР поставляла «Электросила» (г. Ленинград). Недостатками таких конструкций были водяное охлаждение токоведущих частей, большая стоимость, относительная сложность и невысокая надежность.

Известен опыт применения конструкции плоской ЛИМ, разработанной СКБ МГД при институте физики Латвийской АН. Эта ЛИМ выполнена с обмоткой барабанного типа вокруг ярма магнитопровода, с водяным охлаждением катушек и электропитанием от сети промышленной частоты. В силу тонкой футеровки в месте установки индуктора ЛИМ, комплекс показал себя малонадежным.

Более перспективной оказалась конструкция индуктора плоской ЛИМ с перекрещенными обмоткам

по высоте паза, разработанная под руководством В. Н. Тимофеева (А. с. № 1697577) в Красноярском государственном техническом университете. Очевидным преимуществом этого индуктора ЛИМ стало воздушное охлаждение токоведущих частей, что достаточно высоко оценили металлурги. Такие индукторы ЛИМ получили широкое распространение, как в России, так и за рубежом. Однако эти ЛИМ также имеют существенные недостатки. При единичном обмоточном коэффициенте ($k_{об} = 1$) обмотка имеет коэффициент заполнения паза медью не более 0,2 и может быть использована только в двухфазном исполнении, что требует специального источника питания. Далее такая конструкция условно обозначена ЛИМ 1.

Опыт проектирования показал, что многообразие конструктивных исполнений ЛИМ не ограничено представленными вариантами. Индукторы ЛИМ могут выполнять с укороченным шагом обмотки. Такие устройства вполне конкурентоспособны вследствие их достоинств. Примеры исполнения ЛИМ с укороченным шагом представлены на рис. 2, б–г.

Вариант ЛИМ с укороченным шагом обмотки, показанный на рис. 2, б, есть частный случай машины Шербиуса [1] с четырьмя явно выраженными выступами на длину машины, с двухфазной обмоткой с фазной зоной $\alpha = 90$ электрических градусов, с относительным шагом $\beta = 1/2$, двумя парами полюсов $2p = 2$, числом пазов $Z = 4$ и обмоточным коэффициентом $k_{об} = 0,707$. Однако также как и ЛИМ 1, машине (далее ЛИМ 2) свойственны специальные требования к источнику питания.

Значительные перспективы применения имеют индукторы ЛИМ с трехфазной укороченной обмоткой, и с тремя (рис. 2, в) или с шестью явно выраженными полюсными выступами (рис. 2, г) на длину машины. Эти варианты обозначены соответственно ЛИМ 3 и ЛИМ 4. Для электропитания таких конструкций можно применить стандартные транзисторные IGBT-преобразователи частоты. Особенностью трехфазных ЛИМ является возможность их работы в разных схемах включения. Например, катушки ЛИМ 3 можно включать по двум схемам – АВС и АУС (обозначения векторно-топографической диаграммы [1]). При схеме включения АВС индуктор ЛИМ будет иметь параметры: $\alpha = 120$ электрических градусов, $\beta = 2/3$, $2p = 2$, $k_{об} = 0,985$. А по схеме АУС: $\alpha = 60$ электрических градусов, $\beta = 1/3$, $2p = 1$ и $k_{об} = 0,342$. Вторая схема характеризует инверсное включение средней катушки. При этом будет изменен полюсный шаг, что способствует медленному ослаблению бегущего магнитного поля в рабочем зазоре. Поэтому схема АУС имеет преимущества.

В отличие от ЛИМ 3, устройство ЛИМ 4 представляет собой машину Шербиуса с шестью явно выраженными выступами и имеет уже четыре схемы включения:

АЗВХСУ ($\alpha = 60^\circ$, $\beta = 1/3$, $2p = 2$, $k_{об} = 0,342$);

ААВВСС* ($\alpha = 120^\circ$, $\beta = 1/3$, $2p = 2$, $k_{об} = 0,557$);

ААУУСС* ($\alpha = 60^\circ$, $\beta = 1/6$, $2p = 1$, $k_{об} = 0,168$);

АВСАВС ($\alpha = 120^\circ$, $\beta = 2/3$, $2p = 4$, $k_{об} = 0,985$).

Примечание. * Схемы ААВВСС и ААУУСС являются аналогами АВС и АУС, но при этом отличаются наличием двух полюсов на соответствующую фазу.

Такое разнообразие схем соединения позволяет плавно регулировать технологические параметры металлургического оборудования и получать полезные закономерности распределения поля скоростей в рабочем теле.

Таким образом, определение критериев выбора перспективной и эффективной конструкции ЛИМ из рассмотренных выше, является непростой научно-технической задачей и требует проведения исследований до принятия решения. Инструментальным средством поддержки алгоритма принятия решения служат результаты физического и вычислительного эксперимента. С развитием мощных средств численного имитационного моделирования натурные уступают приоритет машинному моделированию. Их применяют с целью верификации численно-математических моделей.

В фундаменте профессиональных инструментов разработчика лежат численные методы [3]. За ними безусловный приоритет при формировании информационной базы для проектного решения. Но для полноценной реализации численных моделей требуются значительные временные и вычислительные ресурсы, что можно отнести к недостаткам.

В определенном смысле численным методам можно противопоставить аналитические методы и модели. Однако эксперименты с ЛИМ показали, что применение инженерных методик расчета линейных машин, вбирающих результаты исследований А. И. Вольдека, Х. И. Янеса [1; 2] и других выдающихся ученых, особенно при учете специфики электромагнитных процессов малополюсных ЛИМ, для различных схем их включения, дают погрешность от 20 до 50 %. Это обусловлено тем, что плоские односторонние ЛИМ с увеличенным рабочим зазором отличаются от вращающихся электрических машин, а методики сгенерированы на базе теории асинхронных двигателей и адаптированы с помощью коэффициентов, получен-

ных из аналитических выражений, с существенными допущениями.

Поэтому для оптимального выбора лучшего конструктивного исполнения ЛИМ была решена задача построения комбинированной математической модели, достоверно отражающей электромагнитные процессы в ЛИМ с учетом описанных особенностей плоских односторонних ЛИМ с увеличенным рабочим зазором. С применением модели в совокупности подсистем среды моделирования ANSYS проведены комплексные исследования и получены результаты, позволяющие сделать обобщающие выводы по принятию решения.

Результаты сравнения плоских ЛИМ различных конструктивных исполнений для типоразмера с активной длиной индуктора ЛИМ $l_1 = 280$ мм (рис. 3), приведены в [3; 4]. Характер процессов учитываемых во всех четырех конструктивных исполнениях, аналогичен ЛИМ-3.

Зависимости тангенциальной составляющей силы F_t от разности фаз $\Delta\phi$ на рабочих зазорах 0,01 м и 0,07 м представлены соответственно на рис. 3, а, б.

При малых рабочих зазорах высокие характеристики имеет ЛИМ-1 (рис. 3, а), что определяется единичным обмоточным коэффициентом, но с увеличением зазора эта конструкция начинает проигрывать ЛИМ-3 (см. рис. 3, б).

Преимущество ЛИМ-3 перед двухфазной ЛИМ-1 наблюдается почти во всем диапазоне рабочих зазоров (рис. 4). При этом ЛИМ-3 не требуется специального источника питания. Она имеет меньшие массогабаритные показатели из-за более компактных лобовых частей и меньшую мощность. При равном электромагнитном напоре достигается экономия электроэнергии в пределах 25–40 % в зависимости от типоразмера индуктора. В результате исследований в качестве прототипа для построения серии предложено использование машины Шербиуса с тремя явно выраженными выступами и схемой включения АУС для всех рабочих зазоров $0,05\tau \geq \Delta \geq 0,5\tau$.

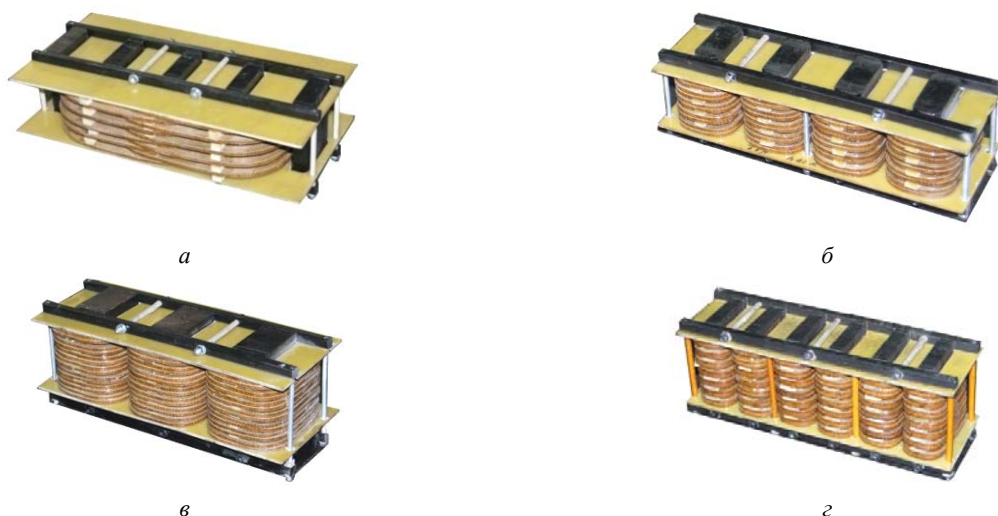


Рис. 2. Конструктивные исполнения плоских ЛИМ

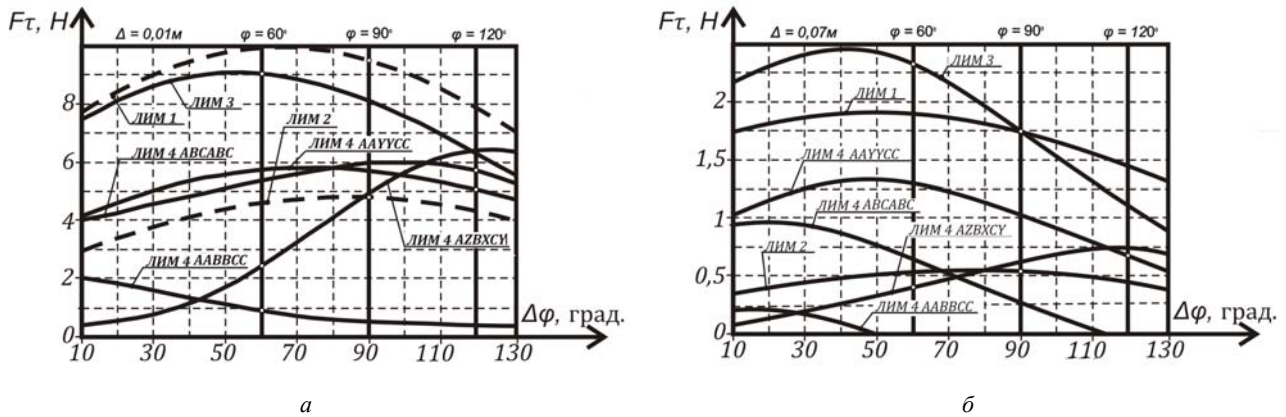


Рис. 3. Интегральные характеристики ЛИМ различных конструктивных исполнений

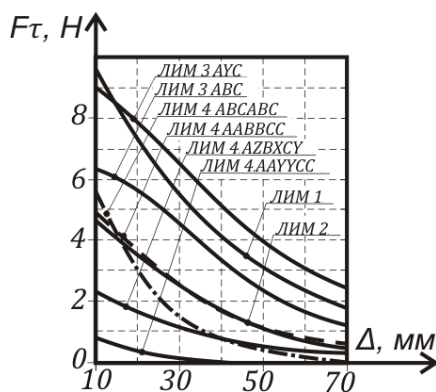


Рис. 4. Зависимости тангенциальной составляющей усилия от рабочего зазора

На основе полученных результатов разработаны рекомендации по применению конкретного конструктивного исполнения ЛИМ при разных величинах рабочего зазора. Сведения, полученные в ходе оптимизационных исследований, положены в основу прикладной задачи проектирования серии линейных машин. Проанализировав полученные зависимости можно сделать общий вывод, что эффективной работы любой из конструкций ЛИМ необходимо проводить анализ, выявления оптимальных размеров и параметров питания.

Примером практического применения полученных результатов может быть выбор оптимальной конструкции и типоразмера ЛИМ для конкретных заданных условий производства. Для примера были заданы следующие условия:

1. Величина рабочего зазора для ЛИМ 40 мм.
2. Заданный уровень тангенциального усилия 2,5 Н.
3. Ограничение по активной длине индуктора не более 220 мм, то есть типоразмер 1 или меньше.

Зависимости тангенциального усилия от величины рабочего зазора представлены на рис. 5. На плоскости с усилиями ЛИМ отмечена точка 3, которая удовлетворяет всем условиям по зазору и усилию. Заданным параметрам ЛИМ удовлетворяют ЛИМ-1 и ЛИМ-3 АУС. Эти варианты ЛИМ даже превышают требуемые условия. Так, например, ЛИМ-1 позволяет разви-

вать на рабочем зазоре 40 мм усилие 2,85 Н (точка 2), а ЛИМ-3 со схемой АУС – 3,7 Н (точка 1). Таким образом, напряжение, а следовательно, и мощность ЛИМ могут быть снижены. Эти же машины при необходимости могут использоваться и на больших рабочих зазорах, например, ЛИМ-1 на зазоре 44 мм, а ЛИМ-3 со схемой АУС – 55 мм.

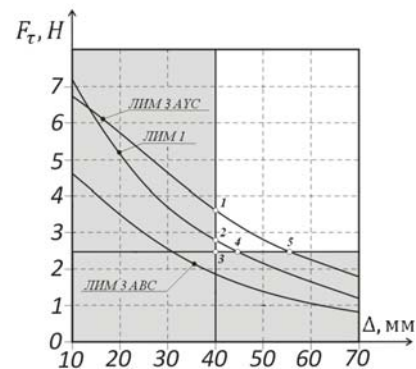


Рис. 5. Пример оптимального выбора конструктивного исполнения ЛИМ по заданным критериям

При массовом выпуске машин для указанных условий целесообразно разработать такую ЛИМ, которая бы удовлетворяла требованиям и имела меньшие массогабаритные размеры и потребляемую мощность. Кривая зависимости усилия от рабочего зазора проходит через точку 3. Эта задача может быть решена путем оптимизационного поиска перебором или с помощью современных стохастических алгоритмов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. В большинстве конструкций ЛИМ, предназначенных для бесконтактного силового воздействия на расплавы металлов, есть запас для повышения их энергоэффективности. Исследованием выявлены пути улучшения ЛИМ, основные достоинства и недостатки в процессе проектирования и эксплуатации.

2. Результаты исследования по численным параметрическим моделям среде ANSYS существующих конструкций, а также альтернатив, позволили выде-

лить варианты ЛИМ с низкими показателями эффективности при одинаковых исходных условиях и обосновать бесперспективность модификации подобных технических решений.

3. Для одного из перспективных решений на основании расчетов проведен выбор конструкции и схемы включения индуктора и получены положительные результаты для конкретных условий эксплуатации.

4. Показано, что при равной линейной токовой нагрузке выгоднее использовать конструкцию ЛИМ-3 с включением по схеме АУС. При этом есть возможность существенно снизить плотность тока в проводнике и тем самым повысить надежность.

5. В результате исследования получен комплекс качественных и количественных критериев для построения алгоритма оптимального выбора конструктивного исполнения ЛИМ и параметров питания.

Библиографические ссылки

1. Вольдек А. И. Индукционные МГД-машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л. : Энергия, 1970.
2. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. Л. : Энергоатомиздат. 1983.
3. Математическое моделирование плоской линейной индукционной машины с увеличенным рабочим зазором / Е. А. Головенко, М. В. Первухин, В. Ю. Неверов и др. // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2010. Т. 6. № 10. С. 21–25.
4. Неверов В. Ю., Ковальский В. В., Михайлов К. А. Оптимизация параметров плоской линейной индукционной машины с жидкометаллическим рабочим телом // Радиотехника, электротехника и энергетика : материалы XV ежегодной междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. МЭИ. Москва, 2009. С. 165–166.

© Головенко Е. А., Горемыкин В. А., Кинев Е. С., Гудков И. С., Бежитский С. С., 2013

УДК 539.21

КЛАСТЕРНАЯ МОДЕЛЬ МАРТЕНСИТНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СПЛАВЕ $Fe_{86}Mn_{13}C$

Л. И. Квеглис¹, В. С. Жигалов², М. Н. Волочаев², А. В. Джес¹

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: kveglis@list.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31. E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru

Сплав $Fe_{86}Mn_{13}C$ обладает уникальными механическими, электрическими и магнитными свойствами благодаря особой модулированной структуре. Благодаря сочетанию свойств проводится изучение тонких пленок $Fe_{86}Mn_{13}C$ как возможного материала для задач спинтроники. В работе представлены результаты расшифровки картин дифракции электронов, полученные от пленок сплава $Fe_{86}Mn_{13}C$, подвергнутых криомеханической обработке. Показано, что мартенсит деформации, обнаруженный в пленках, имеет аналогичную структуру, характерную для сплава $Fe_{86}Mn_{13}C$. Предлагается модель структурообразования мартенсита деформации в виде самоорганизации кластеров при переходе ГЦК-ОЦК структур под воздействием криомеханической обработки. Неоднородная кластерная структура обуславливает эффекты магнитного последдействия в исследуемых материалах.

Ключевые слова: мартенсит деформации, кластерная структура, магнитная вязкость.

CLUSTER MODEL OF MARTENSITIC TRANSFORMATIONS IN THE ALLOY $Fe_{86}Mn_{13}C$

L. I. Kveglis¹, V. S. Zhigalov², M. N. Volochaev², A. V. Dzhes¹

¹Siberian Federal University

26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: kveglis@list.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: zhigalov@iph.krasn.ru

$Fe_{86}Mn_{13}C$ alloy has unique mechanical, electrical and magnetic properties due to the special modulated structure. Due to the combination of these properties in thin films, we study $Fe_{86}Mn_{13}C$ as a possible material for spintronics problems. The results of electron diffraction patterns transcripts obtained from the alloy films $Fe_{86}Mn_{13}C$ are presented in the article. The films were cryomechanically processed. The authors show that deformation martensites observed in the films has structure characteristics similar to the characteristics of alloy $Fe_{86}Mn_{13}C$. The authors offer a model of structure formation of deformation martensites in the form of self-organization of clusters in the transition of FCC-BCC structures under the influence of criomechanical processing. The inhomogeneous structure of the cluster causes the effects of magnetic aftereffect in the investigated materials.

Keywords: deformation martensite, cluster structure, magnetic viscosity.

Известно, что перемещения атомов при мартенситных превращениях в сплавах могут проходить по нескольким схемам [1; 2]. В этом случае кристаллическая решетка исходной фазы когерентно переходит в решетку конечного продукта как при прямом, так и при обратном превращении. Основные схемы ориентационных соотношений исходной и конечной фаз при мартенситных превращениях представлены в работах [1; 2]. В нашей работе предлагается кластерная модель структурной перестройки при мартенситных превращениях на примере сплава $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$, которая позволяет получить практически все представленные авторами указанных работ ориентационные соотношения.

Для исследования мартенситных превращений нами использованы пленки сплава $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$. В сплаве такого состава нами ранее обнаружен знакопеременный термоэлектрический эффект [3].

Пленки $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$ были получены методом термического вакуумного осаждения на установке ВУП-4 при давлении 10^{-5} мм рт. ст. на подложки из стекла и NaCl. Далее пленки отделяли от подложки и исследовали их структуру методом просвечивающей электронной микроскопии и микродифракции на приборах ПРЭМ-200 и (JEM-2100). Для изучения магнитных свойств пленок использовался метод крутящих моментов на магнитометре и индукционный метод построения петель гистерезиса с помощью феррометра.

Картина микродифракции электронов, полученная с пленки сплава $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$, приведена на рис. 1. Из расшифровки следует, что в пленке содержатся мелкодисперсные кристаллиты аустенитной и мартенситной фаз. С помощью двух плоских сеток нами проведена индексация фаз и установлены ориентационные соотношения кристаллитов аустенита и мартенсита.

Треугольная сетка соответствует ориентации ГЦК-фазы аустенита осью зоны [110], квадратная сетка соответствует ориентации ОЦК-фазы мартенсита осью зоны [001]. Соответствующие плоскости совпадают с плоскостью чертежа, как это показано на рис. 1, б. При этом направление [022] ГЦК-решетки параллельно направлению [020] ОЦК-решетки.

Подобная картина представлена в работе [2]. Авторами этой работы исследованы утоненные образцы

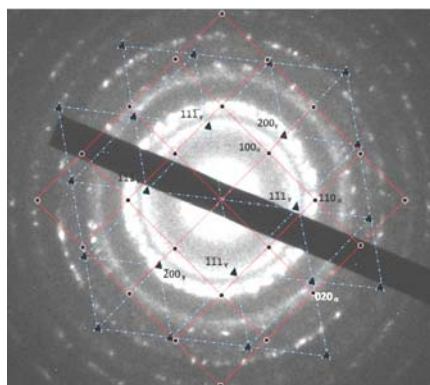
массивного сплава $\text{Fe}_{21,7}\text{Mn}_{14,5}\text{Al}$. Ими обнаружена когерентно связанная аустенитно-мартенситная смесь фаз. В этой же работе представлена таблица известных ориентационных соотношений когерентно связанных кристаллитов аустенита и мартенсита.

Полученные нами и авторами [2] ориентационные соотношения мы предлагаем рассмотреть с позиции кластерного структурообразования. Такой подход позволяет получить практически все известные ориентационные соотношения при мартенситных превращениях кубических фаз.

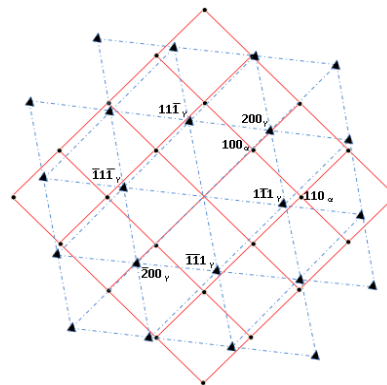
На электроннограмме (рис. 1, а) присутствует дифракционное кольцо, соответствующее плоскости (100) ОЦК-решетки. В этом случае рефлекс (100) является сверхструктурным, а параметр элементарной ячейки такой ОЦК-решетки будет удвоенным относительно известной ОЦК-решетки для сплавов на основе α -железа.

Трехмерные компьютерные модели атомной структуры когерентно связанных фаз показаны на рис. 2. Сборка из двух тетраэдров и одного октаэдра, которая соответствует структурному модулю ГЦК-решетки (рис. 2, а) [4]. Такой модуль фактически является элементарной ячейкой ГЦК-решетки. На рис. 2, б показано сечение модуля ГЦК-решетки плоскостью (110). Такое сечение состоит из четырех одинаковых равнобедренных треугольников. Два равнобедренных треугольника являются сечением октаэдра плоскостью (110) и два – сечениями двух тетраэдров плоскостью (110). Такими треугольниками сформирована треугольная сетка, показанная на рис. 1, б.

Ромбический икосаэдр, составленный из тетраэдрических симплексов ОЦК-решетки, полученных сечением кубической решетки плоскостями типа (110), представлен на рис. 2, в [4]. Фрагмент данной сборки может быть совмещен с ребром октаэдра ГЦК модуля, как это показано на рис. 2, г. При этом половина сборки относится к ГЦК модулю, а другая половина является фрагментом ОЦК-решетки. Стрелками показано возможное переключение химических связей при образовании мартенсита деформации.



а



б

Рис. 1. Картина микродифракции электронов, полученная от пленки сплава $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$ (а) и схема ее расшифровки (б)

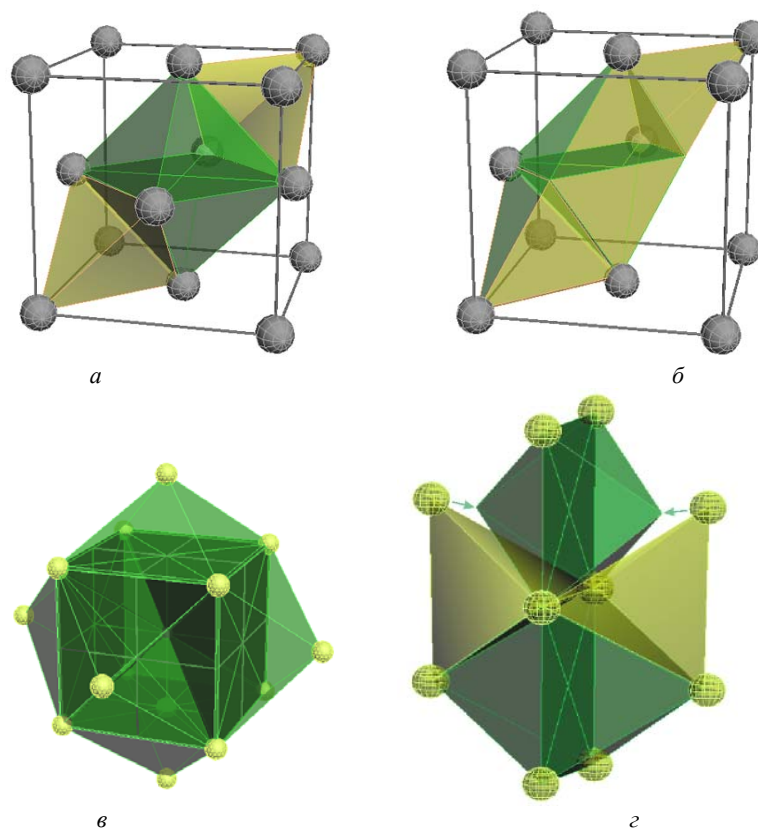


Рис. 2. Компьютерные модели трехмерных кластеров, сделанные в среде 3ds Max

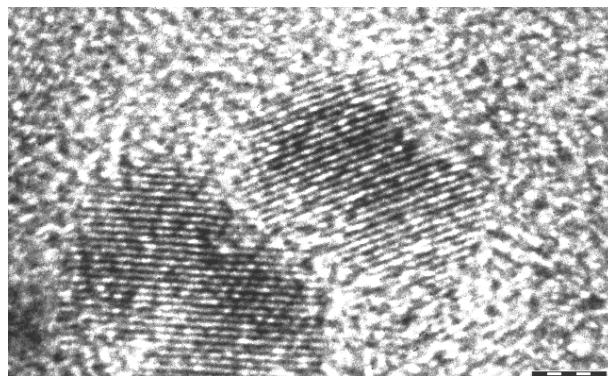
Трехмерное представление ориентационного соотношения ГЦК- и ОЦК-решеток совпадает с экспериментом, показанным на рис. 1, б. Небольшое рассогласование при наложении треугольных и квадратных сеток обусловлено переключением химических связей ГЦК-ОЦК при наложении треугольных граней ГЦК-тетраэдра и ОЦК-сборки (рис. 2, г). Это согласуется с положениями, высказанными в работах [4; 5]. Удвоение периода ОЦК-решетки является результатом такого переключения химических связей, которое, в свою очередь, инициируется механическим воздействием на кристаллическую решетку аустенита при криомеханической обработке.

Предложенная модель хорошо описывает все известные схемы ориентационных соотношений: Курдюмова–Закса, Питча и т. д. [1; 2]. Поскольку при детальном рассмотрении ряда векторов в ГЦК и ОЦК решетках мы можем обнаружить их совпадения в пределах четырех межатомных расстояний. Например вектор $[111]$ ГЦК-решетки может быть параллелен вектору $[110]$ ОЦК-решетки, или вектор $[110]$ ГЦК-решетки параллелен вектору $[001]$ ОЦК-решетки.

Предложенная трехмерная модель ориентационных соотношений позволяет объяснить переход коллектива из нескольких тысяч атомов из одной фазы в другую путем кооперативных сдвигов и поворотов. При этом повороты могут осуществляться в различных направлениях.

На рис. 3 представлено электронно-микроскопическое изображение пленки $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$ высокого разрешения. Мы видим когерентную связь двух соседних

кластеров. Каждая атомная плоскость одного кластера переходит в атомную плоскость другого кластера под некоторым фиксированным углом.

Рис. 3. Изображение в высокоразрешающем электронном микроскопе кластерной структуры пленки сплава $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$

Таким образом, отдельные кластеры соединяются в кластерные агрегаты и формируют пленку в целом.

На когерентную связь отдельных структурных элементов пленки указывает свойство магнитной анизотропии. На рис. 4 показана кривая крутящих моментов, снятая в крутильном магнитометре с чувствительностью $3,76 \cdot 10^{-4}$ Дж в поле с напряженностью 1 кЭ. Кривые крутящих моментов свидетельствуют о том, что намагниченность пленки имеет ярко выраженную анизотропию. Кроме того имеется ярко выраженный анизотропный гистерезис.

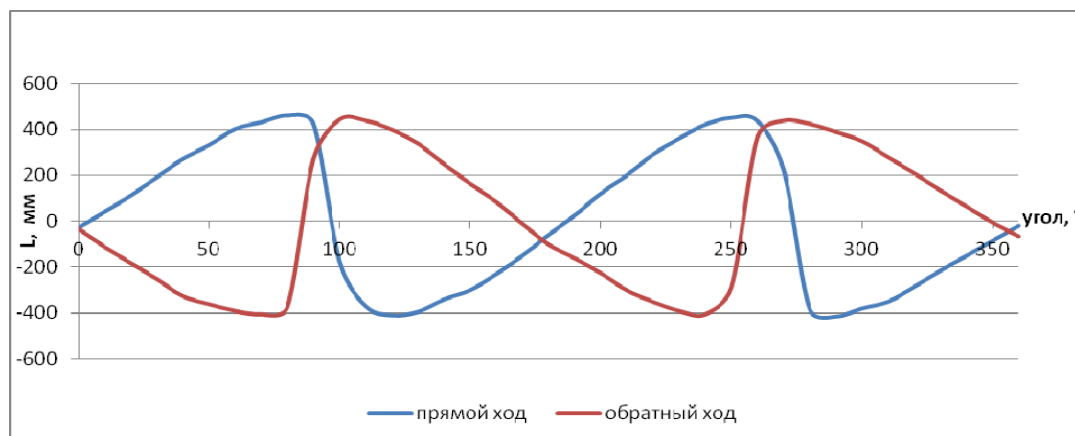


Рис. 4. Кривые крутящих моментов, полученные от пленок $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$ в крутильном магнитометре

Таким образом, исследованы структура и магнитные свойства пленок $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$, обнаружена когерентная связь аустенитно-мартенситной структуры, предложена трехмерная кластерная модель мартенситного превращения, описывающая известные ориентационные соотношения фаз при мартенситных переходах.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории «ИГЕТАС» Восточно-Казахстанского технического университета и заводской лаборатории АО «Востокмашзавод» за помощь в выполнении работы.

Библиографические ссылки

1. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973.
2. Yifeng Liao, Fanling Meng, Ian Baker. L12 precipitates within L21 ordered Fe-21.7Mn-14.5Al // Philosophical Magazine. Vol. 91, Iss. 27, 2011

3. Kveglis L. I., Abylkalykova R. B., Semchenko V. V., Volochaev M. N. The variable thermoelectric Effect in magnetic viscosity Alloy Fe86Mn13C VII International Conference on Mechanochemistry and Mechanical Alloying INCOME 2011, August 31-September 3, 2011, Herceg Novi.

4. Бульёнков Н. А., Тытик Д. Л. Модульный дизайн икосаэдрических металлических кластеров // Известия РАН (Сер. Химия), 2001. № 1. С. 1.

5. Кузьмин В. И., Гадзаов А. Ф., Тытик Д. Л., Белащенко Д. К., Сиренко А. Н. Методы разделения быстрых и медленных движений атомов как основа анализа динамической структуры наночастиц // Российские нанотехнологии, 2010. Т. 5. № 11-12. С. 92-97.

© Квеглис Л. И., Жигалов В. С., Волочаев М. Н., Джес А. В., 2013

UDC 669.715^621.789

IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF BOAT-TYPE SCREWS OF ALUMINIUM-SILICON ALLOY AK12 WITH THE HELP OF THERMAL-CYCLE PROCESSING

G. G. Krushenko

Institute of Computational Modeling of Siberian Branch of RAS
ICM SB RAS Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russia
Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: genry@icm.krasn.ru

The use of thermal-cycle processing improves the mechanical properties of boat screws of aluminium-silicon alloy AK12.

Keywords: thermal-cycle processing, mechanical properties, boat-type screw, aluminium-silicon alloy AK12.

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛОДОЧНОГО ВИНТА ИЗ АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВОГО СПЛАВА АК12 С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Г. Г. Крушенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: genry@icm.krasn.ru

Термоциклическая обработка повышает механические свойства лодочного винта из алюминиево-кремниевого сплава АК12.

Ключевые слова: Термоциклическая обработка, механические свойства, лодочный винт, алюминиево-кремниевый сплав АК12.

One of the first inventions for use the thermocyclic treatment (TCT) of alloys was patented in 1978 [1]. In it on the example of aluminum-silicon alloy there was fixed that as a result of 8–12-multiple cycling the «heating ↔ cooling» process of molded articles its strength (σ_b – for 40,8 %) and plasticity (δ – for 76,4 %) improve at the comparison with a standard regime of thermal treatment «hardening → cooling on air → ageing». The materials of the conference [2] on which there were 75 reports presented show the universality of TCP by its using for improving the mechanical properties of products made of cast iron, steel, aluminum and titanium alloys.

Works on the TCT use are carried out at the present time to improve the mechanical properties of metal products, including those made of aluminium-silicon alloys [3].

TCT was used in this work to improve the mechanical properties of three-bladed helical boat propeller (blades mainly) poured of aluminium-silicon alloy АК12 (10,0–13,0 % Si; the rest – Al) into the casting mold of same alloy. To prevent the influence of molten metal for the form its surface was painted by the fireproof paint containing 3,92 mass % of nanopowder silicium nitride Si_3N_4 (other components: 5,88 % of oxide zinc ZnO ; 11,76 % alkali silicate Na_2SiO_3 , water is the rest) [4].

We investigated the blades of a three-bladed helical boat propeller 240 mm in diameter (Fig. 1) cast into a mold from АК12 alloy (11,2 % Si, 0,4 % Fe, 0,01 % Mg, 0,02 % Cu, and trace amounts of Zn). The thickness of the blades of a complex curvilinear form (surface area = 80,207 cm^2) varied from 1,5 at the periphery to 6,5 mm at the site of transition to the hub.

The microstructures of aluminum-silicon alloys of hypoeutectic and eutectic compositions in the cast state consists of primary dendrites of the α -solid solution and the eutectic, which fills up the space between their branches. The mechanical properties of the these alloys depend on the shape of the precipitates of the silicon phase in the eutectic and the surface area occupied by it. The more rounded the particles of this phase and the smaller their area of cross section, the higher are the mechanical properties of the alloys [5]. According to the service conditions, the blades must have high strength and plasticity. During the use of well-known conditions of heat treatment of binary silumins, the mechanical properties were observed not to increase very much [6]. This is related to the fact that binary silumins do not contain the elements that form strengthening phases and the conditions of the heat treatment used do not give rise to a high degree of coagulation or spheroidizing of the silicon phase owing to the insufficiently high rate of the "dissolution ↔ precipitation" processes. The acicular precipitates of the silicon phase are spheroidized by thermocyclic treatment (TCT) [7]. Although the general rules of the structural formation of silumins are basically well known during TCT [8], additional investigations are required for

the selection of TCT conditions of castings of certain configurations.

The TCT of the boat propeller was performed by the scheme $500 \leftrightarrow 20^\circ\text{C}$ or $550 \leftrightarrow 20^\circ\text{C}$ with the number of cycles $n = 3; 5$; and 7 and a holding time of 10 min at the upper temperature (T_u) and the lower temperature (T_l) and cooling from T_u in the next cycle in either air or water (the conditions of the TCT are presented in Table 1). In order to determine the mechanical properties from the least curvilinear part of the blade (transverse direction), samples were cut out (Fig. 1, b) with a width of $b = 10$ mm. Measurements of the variable thickness h of the samples showed that it linearly varied along the length of the sample. The initial thickness h_i of the samples at the site of their failure was determined from the equations:

$$h_i = h_2 - (h_2 - h_1) \frac{l_i}{l}, \quad (1)$$

where h_1 and h_2 were the thicknesses of the sample at its thin and thick edges respectively, mm; l_i was the distance between the edge and the site of the failure, mm; and l was the length of the sample after the failure, mm. The magnitudes of l and l_i were determined after the tests.

Knowing the initial thickness h_i and the width of the samples ($b = 10$ mm), we calculated their initial surface area F at the site of the failure, mm^2 :

$$F_i = h_i b. \quad (2)$$

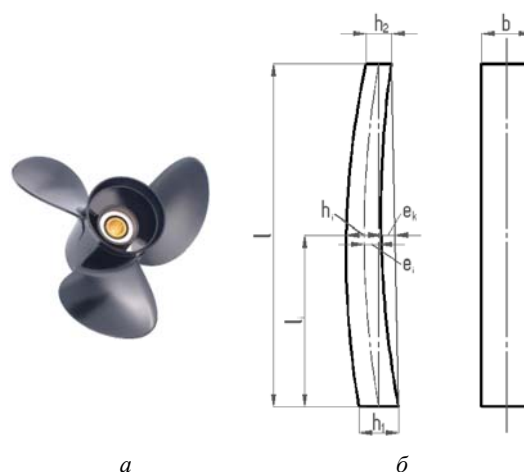


Fig. 1. A three-bladed helical boat propeller [http://www.spbsport.ru/brands/135] (a) and a nonstandard sample for testing the mechanical properties sectioned out of a blade of a helical boat propeller (on fig. 1, a)

We determined the apparent ultimate tensile strength (or the true threshold stress at the moment of the failure), viz., σ_u^{bend} . Because of the curvilinear form, the sample was not only subjected to tension but also to bending and corrections were made in the calculated values of σ_u^{bend} . It is well known that

$$\sigma_u = \frac{P}{F_i}, \quad (3)$$

where P is the maximum force, N.

Considering the bending component

$$\sigma_u^{\text{bend}} = \frac{P}{F_i} + \frac{P \cdot e_i}{W}, \quad (4)$$

where e_i is the eccentricity of the sample at the site of the failure, mm; $P \cdot e_i$ is the bending moment, N, mm; and

$W = b \cdot \frac{h_i^2}{6}$ is the areal moment of inertia, mm.

The eccentricity e_i at any point i (Fig. 1) was determined by the equation:

$$e_i = e_k + h_i [2 - (h_1 + h_2)]/4, \quad (5)$$

where e_k is the eccentricity on the lateral surface of the sample, mm.

Using simple transformations, Eq. (4) takes on the form

$$\sigma_u^{\text{bend}} \frac{P}{F_i} \left(1 + \frac{6e_i}{b}\right) = \sigma_u \cdot \beta. \quad (6)$$

The results of the tests are presented in Table I. It can be seen that, under all conditions except 9, the properties of the samples after TCT are consistently greater than the properties in the cast state. The highest strength properties were reached after TCT under conditions 4. Upon TCT under identical conditions but cooling in air, the strength indices were somewhat lower in value.

The high level of the mechanical properties of the AK12 alloy after TCT under some conditions was caused by the features of the microstructural formation. Cyclic repetition of the heating and cooling conditions of the alloy leads to fragmentation, spheroidization, and coagulation of the crystals of the silicon phase as a result of the occurrence of the processes of partial dissolution and precipitation of the phase components. The dissolution of silicon in alumi-

num was observed to be maximum upon heating to 500–550 °C during the course of the TCT. During the subsequent cooling to 20 °C, the excess silicon precipitated out of the matrix solution. A TCT with a greater number of cycles than the optimum produced high mechanical properties but led to growth of acicular silicon crystals. For example, after TCT with $n = 3$, a significant amount of refinement took place compared to the structure of the cast alloy with respect to the silicon component of the eutectic (Fig. 2, a, b). Upon TCT with $n = 5$, the silicon component of the eutectic became coarser in size (Fig. 2, c) whereas, for $n = 7$, the eutectic significantly coarsened.

Consistent with the structural features, the maximum strength properties were obtained in the alloy after TCT with $n = 3$, which formed the finest dispersion of the eutectic, whereas the highest plasticity was obtained in the alloy after TCT with $n = 5$ where the eutectic silicon was spheroidal in shape. These results of the investigation are in agreement with the literature data: it was determined in [9; 10] that a higher strength resulted from refinement of the silicon phase whereas plasticity increased due to the spheroidization of the precipitates of this phase.

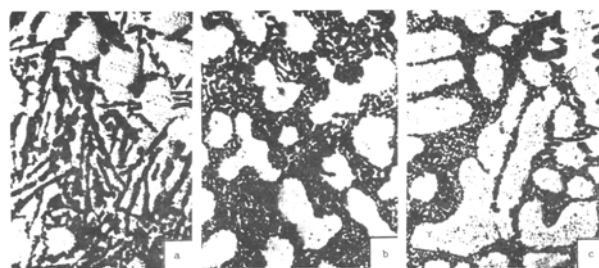


Fig. 2. Microstructure of the AK12 alloy ($\times 150$):
a – as-cast state; b, c – TCT by the scheme $550 \leftrightarrow 20$ °C,
cooling in water, $n = 3$ and 5 respectively

Table 1

Mechanical properties samples sectioned out of a blade of a boat propeller

Condi-tions of TCT	Scheme of TCT	Number of thermal cycles, n	Coding me-dium	σ_u	σ_u^{bend}	$\delta_{\text{apr}}^{\prime}$, %	HB
				N/mm ²			
Cast (starting) state		—	—	107	145	3.3	50
1	500 ↔ 20 °C	3	Air	129	173	10.0	55
2		5		119	160	20.0	51
3		7		124	167	8.6	52
4		3	149	194	6.7	56	
5	550 ↔ 20 °C	5	Water	119	160	6.7	51
6		7		126	172	10.0	51
7		3		138	186	6.7	56
8		5	111	139	20.0	51	
9		7	Air	107	143	4.7	53
10		3		121	163	13.3	56
11		5		115	148	13.3	51
12		7	111	148	6.7	53	

Notations: σ_u^{bend} is the apparent ultimate tensile strength determined by considering the bending of the sample of a curvilinear propeller blade during the tensile test.

However, one should note that, in spite of the fairly high absolute increase in the strength of the alloy (compared to the as-cast state), not a single one of the conditions of TCT met the requirement of GOST 2685–75, viz., $\sigma_u \geq 160 \text{ N/mm}^2$. Correcting σ_u by Eq. (6), we obtained an estimate for the value of the ultimate tensile strength considering bending, i. e., σ_u^{bend} . It was determined (Table 1) that, after TCT of the alloy by the scheme $500 \leftrightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$ σ_u^{bend} bend was greater than σ_u by 30,0–36,8 %, i. e., $\beta = 1,33$ in Eq. (6) and $\sigma_u^{\text{bend}} = 160\text{--}194 \text{ N/mm}^2$. Upon TCT by the scheme $550 \leftrightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$, σ_u^{bend} turned out to be greater than σ_u by 24,7–31,8 % ($\beta = 1,296$) and was equal to 139–186 N/mm². Thus, at lower T_u , the calculated values of σ_u^{bend} do meet the requirements of GOST 2685–75 ($\sigma_u \geq 160 \text{ N/mm}^2$). The legitimacy of the correction to σ_u by considering the bending moment is supported by the results of investigation of the mechanical properties of standard cylindrical samples 12 mm in diameter cast from the AK12 alloy of the same composition in a vertical mold. Such samples after TCT by the scheme $500 \leftrightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$ followed by water quenching had $\sigma_u = 210 \text{ N/mm}^2$.

Conclusions. The mechanical properties of samples of the AK12 alloy sectioned out of blades of helical boat propellers after TCT are higher in value than those for the as-cast samples. The highest values of σ_u were reached after TCT by the scheme $500 \leftrightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($n = 3$) followed by water quenching.

References

1. А. с. СССР 603695 Способ термической обработки алюминиевых сплавов / В. К. Федюкин,

Б. Н. Подзоров, В. Н. Платонов, Б. М. Лапина. БИ. 1978. № 15.

2. Термоциклическая обработка металлических изделий. Л. : Наука, 1982.

3. Biront V. S., Anikina V. I. and Kovaleva A. A. Dilatometer analysis of structural transformations in the aluminium-silicon alloys during the thermo-cyclic processing // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2009. Vol. 2. № 4. P. 384–393.

4. Крушенко Г. Г., Балашов Б. А., Василенко З. А. Новая кокильная краска для отливок из алюминиевых сплавов // Литейное производство. 1995. № 6. С. 26.

5. Крушенко Г. Г., Торшилова С. И., Сычевник Н. Н. Зависимость свойств силумина от чистоты шихты // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1972. № 5. С. 124–125.

6. Колобнев И. Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов. М. : Металлургия, 1973.

7. Тихонов А. С. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов. М. : Наука, 1984.

8. Горелик С. С., Биронт В. С., Заиграйкина Б. С. Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства силуминов // Металловедение и термическая обработка металлов, 1983. № 5. С. 48–50.

9. Белафин А. Д., Подзоров Б. Н., Смагоринский М. Е. Высокотемпературная термоциклическая обработка порошкового силумина // Цветные металлы, 1984. № 7. С. 74–76.

10. Монин В. Н., Подзоров Б. Н., Казакевич Г. С. Структурные напряжения в алюминиево-кремниевых сплавах при термоциклической обработке // Цветные металлы, 1981. № 3. С. 79–80.

© Krushenko G. G., 2013

УДК 544.18, 538.91

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ АТОМОВ ЛИТИЯ НА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУРАХ*

А. А. Кузубов, Н. С. Елисеева, А. С. Федоров, Д. А. Федоров, Л. В. Тихонова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: alex_xx@rambler.ru

Представлено теоретическое исследование различных углеродных наноструктур (фуллерены, бискугут, дефекты углеродных плоскостей) как потенциального материала для изготовления анодов в литий-ионных батареях. Рассмотрены процессы сорбции атомов и кластеров лития в объем и на поверхности данных материалов.

Ключевые слова: литий-ионные батареи, сорбция лития, углеродные наноструктуры, фуллерены, теория функционала плотности (DFT).

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 2012-1.2.1-12-000-2004-2205.

THEORETICAL RESEARCH OF SORPTION OF ATOMS OF LITHIUM ON CARBON NANOSTRUCTURES

A. A. Kuzubov, N. S. Eliseeva, A. S. Fedorov, D. A. Fedorov, L. V. Tikhonova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: alex_xx@rambler.ru

In the work the authors present theoretical research of various carbon nanostructures (fullerenes, defects of the carbon planes) as potential material for production of anodes in lithium – ion batteries. Processes of sorption of atoms and lithium clusters in the volume and on the surfaces of these materials are considered as well.

Keywords: lithium-ion batteries, lithium sorption, carbon nanostructures, fullerenes, density functional theory (DFT).

Литий-ионные аккумуляторы в настоящее время являются самым перспективным источником энергии для портативной техники. Это связано с высоким уровнем удельных энергетических и мощностных характеристик, сохраняемостью и надежностью. В последнее время прилагаются большие усилия для улучшения их качеств: увеличения емкости и срока службы. В настоящее время анодным материалом для литий-ионных аккумуляторов является графит. Это связано с достаточно большим циклом жизни, изобилием и относительно низкой стоимостью материала. Тем не менее графитовый анод имеет недостатки, связанные с низкой плотностью энергии ($375 \text{ мА} \cdot \text{ч}^{-1}$) и безопасностью. Таким образом, наблюдается заинтересованность в развитии альтернативных анодных материалов с низкой стоимостью, повышенной безопасностью, высокой плотностью энергии и большим сроком службы [1–9].

В качестве материалов анода рассматривались и другие соединения углерода. Теоретическое исследование идеального Li-биграфена Li_xC_{64} ($x = 1 \div 6$) с укладками AαA и AαB показало, что укладка AαA более стабильна. Общая энергия структуры уменьшается при увеличении x . По мере увеличения числа ионов лития биграфен с укладкой AαB превращается в биграфен с укладкой AαA. Однако при этом было показано благоприятное действие вакансий углерода в биграфене AαA. Расположение лития вблизи вакансий энергетически выгоднее, чем на идеальной поверхности [10]. При этом структуры графена с атомами Li, расположенными над центром шестиугольников, по-прежнему стабильнее, чем с атомами Li над атомами углерода или над связями C-C [11]. Наблюдается благоприятное действие и других дефектов на адсорбцию лития. В работе [12] были проведены DFT-расчеты идеальной гексагональной поверхности и поверхностей с дефектами (дефект Стоуна–Вэlsa, моновакансии, дивакансии). Энергия адсорбции для данных структур составляет 1,69 эВ, 1,94 эВ, 3,12 эВ и 2,36 эВ соответственно. Таким образом, искривление идеально плоской углеродной структуры приводит к увеличению стабильности адсорбционного комплекса с литием и, как следствие, его концентрации в анодном материале.

Поскольку фуллерен представляет собой искривленную поверхность содержащую 12 пятиугольников

и 20 шестиугольников, он может стать альтернативой графиту. Взаимодействие лития с фуллереном достаточно активно моделировалось квантово-химическими методами [13–15]. В работе [13] атом лития помещался строго над одним из шестичленных колец в фуллере. В расчетах в результате частичного переноса заряда от атомов Li к C_{60} формировался фуллерид-анион. Энергия взаимодействия между фуллереном и литием, рассчитанная методом B3LYP, достаточно велика (1,52 эВ). Величина энергии показывает, что образование связи лития с фуллереном значительно выгоднее, чем образование кластеров лития вокруг C_{60} . При этом расстояние от Li до C_{60} составляет $\sim 2,3 \text{ \AA}$, что сопоставимо с расстояниями между молекулами фуллерена в фуллерите (10 Å) и с размерами тетраэдрических и октаэдрических полостей (2,210 Å и 4,210 Å соответственно) и позволяет надеяться на возможность образования фуллеридов лития.

Большой интерес к исследованию фуллерена C_{60} и его интеркалированных соединений связан с возможностью этой молекулы полимеризоваться [16–20]. Полимерные формы C_{60} привлекают разнообразием кристаллических структур, интересными электронными, магнитными, оптическими и механическими свойствами. Фуллерены имеют высокое значение сродства к электрону (2,65 эВ). Свободные зоны проводимости, сформированные t_{1u} - и t_{1g} -орбиталями, могут принимать по 6 электронов [21]. Это дает фуллерену возможность принимать электроны лития.

Для фуллеридов лития Li_xC_{60} возможен большой диапазон допирования ($x = 1 \div 30$). Li_xC_{60} с $x = 1 \div 28$ были экспериментально получены в работах [22; 23] при высоком давлении и температуре. В образцах с $x = 1, 4, 16$ были обнаружены три фазы: тригональный (3R) 2D-полимер, тетрагональный (T) 2D-полимер и ГЦК-мономер. Электрическая проводимость при комнатной температуре для $(\text{LiC}_{60})_{\text{HP}}$ 3R 2D-полимера, $(\text{Li}_4\text{C}_{60})_{\text{HP}}$ T 2D-полимера и $(\text{Li}_{16}\text{C}_{60})_{\text{HP}}$ ГЦК мономера составляет $1,8 \cdot 10^{-4}$, $1,2 \cdot 10^{-1}$ и $6,4 \cdot 10^{-1} \text{ См/см}$ соответственно [23]. Наиболее изученной является 2-D моноклинная фаза Li_4C_{60} [16; 17]. Эта структура является первым примером полимеров фуллеренов со смешанным типом связей: с простыми C-C связями и с межфуллереновыми связями, образованными по типу [2+2] циклоприсоединения. Длины мостиковых C-C связей принимают значения 1,75 и 1,59 Å, которые

являются несколько больше, чем типичные ковалентные. Изучение структурных свойств Li_4C_{60} методом рентгеновской дифракции показало, что она действительно имеет вид слоистой полимерной структуры с сильно выраженными анизотропными свойствами [16; 18; 20]. Однако при нагревании выше 460 К полимерная структура разрушается [19; 20].

Полимер Li_4C_{60} имеет чрезвычайно высокую ионную проводимость (10^{-2} См/см при комнатной температуре), при этом наблюдается частичный перенос заряда от Li к C_{60} [19]. Высокая ионная проводимость обусловлена низкой энергией активации диффузии ионов Li^+ , которая составляет 0,2 эВ. При этом ширина запрещенной зоны для данного соединения велика (0,77 эВ), а наблюдаемая экспериментально остаточная проводимость не является внутренней электронной проводимостью и возникает, вероятно, из-за дефектов в структуре [24]. Таким образом, именно высокое сопротивление делает материалы на основе чистых фуллеренов малоперспективными. Однако при этом возможно использование комплексных электронов, которые представляют собой смесь фуллеренов с углеродными плоскостями или нанолентами.

Взаимодействие лития с кресловидными нанолентами и двумерным графеном гораздо ниже (1,70 и 1,55 эВ соответственно в LSDA-расчете и 1,04 и 1,20 эВ в PBE-расчете), чем с зигзагообразными нанолентами (энергия связи по краям нанотрубки составляет 2,27 – LSDA и 1,70 эВ – PBE). При смещении положения адсорбции от краев к центру зигзагообразной наноленты энергия связи уменьшается. Предполагается, что узкие графеновые наноленты будут идеальным вариантом для достижения адсорбции большой концентрации ионов лития [25].

Все вышеизложенное указывает на возможность создание композитных материалов на основе фуллеренов и углеродных плоскостей с существенно большей емкостью по литию, чем в существующих анодах.

Методы исследования. В настоящей работе исследования осуществлялись с помощью квантово-химического моделирования в лицензионном программном пакете VASP 5.3 (Vienna Ab-initio Simulation Package) [26–28] в рамках метода функционала плотности (DFT) [29; 30] с использованием базиса плоских волн и PAW формализма [31; 32]. Вычисления проводились в рамках обобщенного градиентного приближения (GGA) – обменно-корреляционного функционала PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) с коррекцией Grimme, учитывающей ван-дер-ваальсово взаимодействие [33]. Энергия обрезания плоских волн в расчетах равнялась 287 эВ. При моделировании всех исследуемых структур проводилась оптимизация геометрии до значения максимальных сил, действующих на атомы, равных 0,01 эВ/Å.

Результаты и обсуждение. На первом этапе работы проводилось моделирование взаимодействия одиночного атома лития углеродными кластерами различного типа (рис. 1). Это было сделано для выявления эффекта влияния искажения углеродной плоскости на величину энергии сорбции. Искривление поверхности получалось при наличии в кластере од-

ного семи- или пятиугольника. Для сравнения проводилось моделирование сорбции на плоском кластере, построенном только из шестиугольных колец. Для уменьшения граничного эффекта кластера центральный многоугольник (пяти-, семи- или шестиугольник) по периметру был окружен поясом двойных шестигранников, при этом атомы, расположенные на границах кластера, были связаны с атомами водорода для устранения влияния оборванных связей. Для случаев углеродных структур с пяти- и семиугольниками проводилось моделирование комплексов с координацией атома лития с различных сторон центрального многоугольника (рис. 1, а, в, е, ж).

Для исключения взаимодействия образов кластеров, находящихся в соседних ячейках в данных расчетах с периодическими условиями задавался вакуумный промежуток 15 Å вдоль каждого из направлений прямоугольной ячейки. Обратное пространство в данном случае содержало в себе только одну точку (z).

Энергия образования комплекса атома лития с углеродным кластером рассчитывалась по следующей формуле:

$$E = \frac{E_{\text{кластер-Li}} - E_{\text{кластер}} - nE_{\text{Li}}}{n},$$

где $E_{\text{кластер-Li}}$, $E_{\text{кластер}}$, E_{Li} – соответственно полные энергии комплекса углеродной структуры с атомами лития, без атома лития и одного атома лития в элементарной ячейке его монокристалла наиболее стабильной фазы, n – число атомов лития в комплексе.

Согласно результатам расчетов (табл. 1) энергия образования комплекса с неискривленным кластером положительна, что говорит о невозможности его существования. В то же время экспериментальный факт образования карбида лития LiC_6 объясняется, скорее всего, тем, что в подобных соединениях атомы лития взаимодействуют с двумя углеродными плоскостями, что должно уменьшать энергию образования связи. Наличие в кластере геометрических искажений за счет семи- или пятиугольников приводит к существенному понижению энергии образования комплекса. Наиболее энергетически выгодными являются соединения одиночного атома лития с углеродными структурами, включающими в себя пятиугольники. Таким образом, структурные искажения плоских наноструктур должно приводить к увеличению их сорбционной емкости по литию.

Таблица 1

Рассчитанные энергии образования комплекса одиночного атома лития с углеродными кластерами

	Энергия образования комплекса, эВ	
	Внутренняя сторона	Внешняя сторона
Пятиугольник	–1,202	–0,980
Шестиугольник	0,456	–
Семиугольник	–0,265	–0,260

Еще одним типом дефектов, которые встречаются в sp^2 -гибридизованных модификациях углерода, явля-

ется дефект Стоуна–Вэlsa. Его сущность заключается в одновременном замещении четырех соседних шестиугольников на два пяти- и два семиугольника (рис. 2). Подобная замена не вызывает искажения плоскости, однако также может привести к изменению сорбционной активности углеродной структуры.

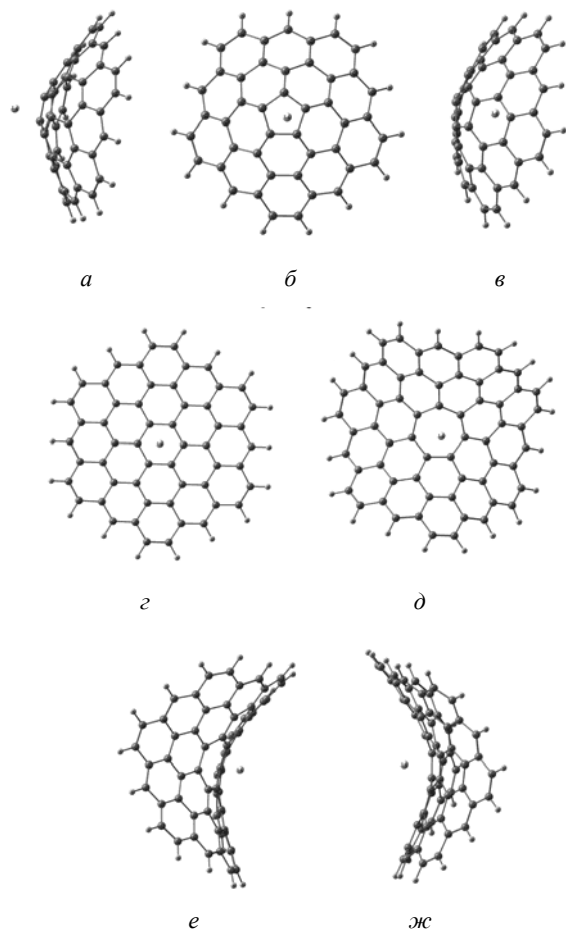


Рис. 1. Комплексы лития с углеродными кластерами; *а* – атом лития расположен с внешней стороны пятиугольника; *б* – фронтальный вид комплекса, содержащего пятичленный цикл; *в* – атом лития расположен с внутренней стороны пятиугольника; *г* – атом лития координирован над шестиугольником; *д* – фронтальный вид комплекса, содержащего семичленный цикл; *е* – атом лития расположен с внешней стороны пятиугольника; *ж* – атом лития расположен с внутренней стороны пятиугольника

Моделирование взаимодействия одиночного атома лития с дефектом Стоуна–Вэlsa проводилось двумя способами. В первом использовалась кластерная модель, включающая в себя два пяти- и два семиугольника, а также пояс из десяти шестиугольников расположенных вокруг дефекта (рис. 2, *б*). В этом случае параметры расчетов целиком совпадали с кластерными расчетами, представленными выше. Во втором варианте проводился расчет 2D-периодической плоскости, представленной в виде суперячейки, построенной из 11×11 элементарных ячеек графена (рис. 2, *а*). Подобная структура содержала в себе один дефект Стоуна–Вэlsa, что исключало взаимодействие де-

фектов в соседних периодически повторяющихся образцах ячеек. Для отделения плоскостей, находящихся в соседних ячейках, в расчетах с периодическими условиями задавался вдоль нормали к плоскости вакуумный промежуток $15 \text{ \AA}$, величина которого подбиралась исходя из предположения, что на данном расстоянии соседние плоскости не будут взаимодействовать друг с другом. Обратное пространство в первой зоне Брюллюэна автоматически разбивалось на сетку по схеме Монхорста–Пака, количество *k*-точек вдоль каждого из направлений составляло $2 \times 2 \times 1$. Расчеты проводились для различных расположений атома лития над многоугольниками дефекта (пяти- и семиугольниками), а также и над ближайшими неэквивалентными шестиугольниками (рис. 2, положения 1, 2, 3). В случае периодической структуры дополнительно моделировалось положение лития над шестиугольником, находящимся во второй координационной сфере окружения относительно дефекта (рис. 2 *А*, положение 4). Для каждого комплекса вычислялась энергия образования по формуле (1). Результаты расчетов представлены в табл. 2. Анализируя зависимость стабильности комплекса от места локализации одиночного атома лития можно сделать вывод, что наиболее выгодными местами его координации будут дефекты. Несмотря на то, что дефект Стоуна–Вэlsa не приводит к искажению углеродной плоскости, расположение лития над пятиугольником будет в подобных структурах предпочтительным. Наличие в наноструктуре подобного дефекта будет приводить и к стабилизации комплексов, в которых атом Li координируется над шестиугольниками. Однако эффект влияния семи- и пятиугольников является локальным, поскольку в структуре, в которой литий располагается над шестиугольником второй сферы окружения (положение 4), энергия образования опять становится положительной, как и для случая обычной углеродной плоскости, построенной из шестиугольников. Таким образом, существенное влияние семи- или пятиугольников на сорбционные способности углеродных sp^2 -гибридизованных структур может проявляться только в случае их существенной концентрации. Подобными объектами могут оказаться углеродные материалы, содержащие молекулы фуллеренов или структуры, включающие в себя большое количество искаженных плоскостей – модифицированный графит, теоретической моделью которого может являться *buckygum*, предложенная в работе [34].

На следующем этапе работы изучалась сорбционная емкость фуллеренов. Первоначально проводились расчеты по определению наиболее выгодного места координации одиночного атома лития возле молекулы фуллерена. Параметры моделирования в данном случае были аналогичны параметрам для кластерных моделей.

Энергия образования комплекса лития с отдельной молекулой фуллерена, в случае когда атом лития располагается над шестиугольником, $-0,2203 \text{ эВ}$. Положение одиночного атома лития над пятиугольником фуллерена менее выгодно $-0,1478 \text{ эВ}$.

Таблица 2

**Рассчитанные энергии образования комплекса
одиночного атома лития с углеродными
структурами, содержащие в себе дефект Стоуна–Вэlsa**

	Энергия образования комплекса, эВ	
	Кластерная модель	Периодическая модель
Семиугольник	–0,281	–0,253
Пятиугольник	–0,156	–0,450
Шестиугольник, положение 1	0,048	–0,226
Шестиугольник, положение 2	–0,111	–0,382
Шестиугольник, положение 3	0,058	–0,019
Шестиугольник, положение 4		0,049

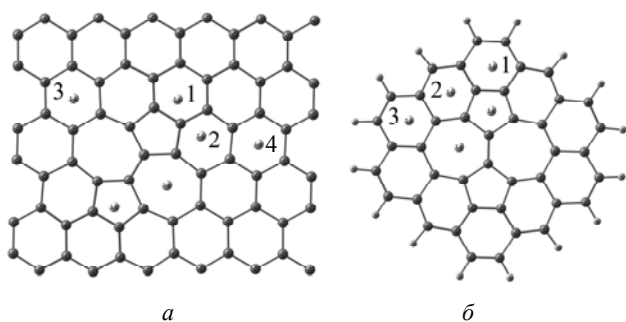


Рис. 2. Комплексы лития с углеродными кластерами, содержащими дефект Стоуна–Вэlsa:
а – периодическая модель; б – кластерная модель

Далее оценивалась потенциальная емкость фуллерита, который представляет собой молекулярный кристалл, в узлах решетки которого находятся молекулы фуллерена. При нормальных условиях молекулы фуллерена образуют гранецентрированную кубическую кристаллическую решётку. Поскольку в фуллерите молекулы связаны между собой Ван-дер-Ваальсовыми силами, в кристалле существуют достаточно большие полости, в которых могут координироваться атомы или кластеры примесей. При моделировании фуллерита и композитного материала с литием на его основе помимо оптимизации геометрии соединения дополнительно проводилась процедура оптимизации объема элементарной ячейки. Ее сущность заключалась в варьировании векторов трансляции ячейки с целью нахождения объема, соответствующего минимуму энергии системы. В ходе применения подобной методики для фуллерита был получен период ГЦК-решетки, равный 14,4 Å, что хорошо согласуется с экспериментальным значением (~14,2 Å). Поскольку при моделировании фуллерита и его композитов с литием проводился расчет периодических структур, применялось разбиение обратного пространства в первой зоне Брлюэна на сетку по схеме Монхорста–Пака 2×2×2. Расчет энергии образования композита проводился по формуле, аналогичной формуле (1). Увеличение числа атомов лития в композите проводилось последовательно путем их добав-

ления в оптимизированную структуру с предыдущим значением концентрации. Кроме того, рассчитывалось несколько возможных мест координации лития, после чего для последующего анализа выбиралось соединение с минимальной энергией. Результаты моделирования представлены в табл. 3.

Согласно полученным данным энергия образования композита литий/фуллерит остается отрицательной в достаточно широком интервале концентраций. При этом по мере увеличения количества сорбируемых атомов в элементарной ячейке фуллерита происходит последовательное увеличение энергии образования. Это связано с тем, что в процессе взаимодействия лития с фуллереном происходит переход электрона с атома щелочного металла на углеродную структуру [13]. Поэтому увеличение энергии связано с электростатическим отталкиванием положительно заряженных литиев. Помимо увеличения энергии одновременно происходит и увеличение размеров элементарной ячейки. При увеличении числа атомов лития до 40 объем моделируемой системы увеличился на 80 %, что, скорее всего, должно приводить к необратимой деградации материала анода батареи. Таким образом, наибольшая массовая доля лития в композите может, согласно нашим расчетам достигать 0,28, что существенно выше, чем содержание лития в карбиде LiC_6 , который является основой современных анодов литий-ионных батарей.

Таблица 3

**Энергии образования соединения, массовая доля
лития и изменение объема элементарной ячейки
для композита литий/фуллерит с различным
количеством атомов лития в системе**

Число атомов лития в системе	Массовая доля лития в композите	Энергия образования комплекса, эВ	Относительное изменение объема
4	0,037	–1,508	0,038
12	0,104	–0,987	0,017
16	0,135	–0,771	0,073
24	0,189	–0,534	0,251
28	0,214	–0,452	0,309
30	0,226	–0,424	0,341
32	0,237	–0,390	0,349
34	0,248	–0,356	0,388
36	0,259	–0,338	0,447
40	0,280	–0,297	0,852

Далее в работе проводилось исследование сорбционной емкости по литию углеродной структуры buckygum, которая является моделью вспененного графита (рис. 3). Она представляет собой аналог фуллерена C_{60} с отрицательно искривленной поверхностью, что достигается посредством замены углеродных пятиугольников на семиугольники. Buckygum – периодическая структура с гранецентрированной кубической решеткой, элементарная ячейка которой содержит в себе 168 атомов и соответствует пространственной группе симметрии $\text{Fd}\bar{3}$. При моделировании buckygum и его композитов с литием прово-

дился расчет с разбиением обратного пространства в первой зоне Брлюэна на сетку по схеме Монхорста–Пака 2×2 . Энергия образования композита вычислялась по формуле, аналогичной формуле (1). Как и в случае фуллерита, для структуры buckyugum и его соединений с литием проводилась процедура оптимизации объема ячейки.

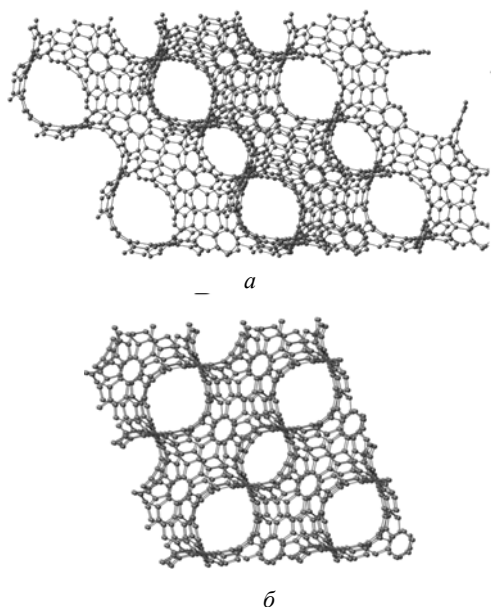


Рис. 3. Суперячейка buckyugum, состоящая из $3 \times 3 \times 3$ элементарных ячеек: *a* – вид со стороны поверхности (100); *б* – вид со стороны поверхности (001)

Полученная в ходе расчетов энергия образования композита (табл. 4) указывает на возможность получения подобного соединения. При этом согласно результатам моделирования объем элементарной ячейки, в отличие от фуллерита, меняется незначительно (для представленных концентраций менее 4 %). Это объясняется строением исходной углеродной структуры, которая имеет достаточно большую, к тому же искривленную поверхность, с высоким содержанием семичленных колец. Кроме того, геометрия структуры предполагает наличие в ней объемных полостей. Все эти факторы позволяют говорить о возможности образования композитного материала литий/ buckyugum, с высоким содержанием лития (~20 %). Это говорит о возможности использования модифицированного графита в качестве эффективного материала для анодов в литий-ионных батареях.

В ходе работы с помощью DFT-расчетов проведена оценка перспективности применения композитов литий/фуллерит и литий/buckyugum как анодных материалов при изготовлении литий-ионных аккумуляторов. Было показано, что наличие в углеродных структурах пяти- или семиугольников приводит к увеличению ее сорбционной емкости. Предельным случаем подобных модифицированных углеродных объектов являются фуллерит и buckyugum, в которых при образовании композита массовая доля лития может составить более 20 %.

Таблица 4

Энергия образования соединения, массовая доля лития и изменение объема элементарной ячейки для композита литий/buckyugum с различным количеством атомов лития в системе

Число атомов лития в системе	Массовая доля лития в композите	Энергия образования комплекса, эВ	Относительное изменение объема
36	0,111	–0,286	–0,013
40	0,122	–0,317	0,007
46	0,138	–0,331	0,007
50	0,148	–0,328	0,007
56	0,163	–0,333	0,028
60	0,172	–0,351	0,007
66	0,186	–0,334	0,012
70	0,196	–0,324	0,017
76	0,209	–0,325	0,035

Авторы выражают благодарность Институту компьютерного моделирования СО РАН (Красноярск), Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН (Москва), компьютерному центру СФУ, а также НИВЦ МГУ Лаборатории параллельных информационных технологий (система СКИФ МГУ «Чебышев») за предоставление возможности использования вычислительных кластеров, на которых были проведены все расчеты.

Библиографические ссылки

1. Scrosati B. Recent advances in lithium ion battery materials // *Electrochimica Acta*. 2000. Vol. 45. P. 2461–2466.
2. Yazami R. From Rome to Como: 20 years of active research on carbon-based electrodes for lithium batteries at INP-Grenoble // *Journal of Power Sources*. 2001. Vol. 97. P. 33–38.
3. Львов А. Л. Литиевые химические источники тока // *Соросовский образовательный журнал*. 2001. Т. 7. № 3. С. 45–51.
4. Кулова Т. Л., Никольская Н. Ф., Скундин А. М. Необратимые процессы при интеркаляции лития в графит: образование пассивной пленки // *Электрохимия*. 2008. Т. 44. № 5. С. 602–608.
5. Scrosati B., Garche J. Lithium batteries: Status, prospects and future // *Journal of Power Sources*. 2010. Vol. 195. P. 2419–2430.
6. Wei-Jun Zhang. A review of the electrochemical performance of alloy anodes for lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. 2011. Vol. 196. P. 13–24.
7. Reality and Future of Rechargeable Lithium Batteries / H. Tao, Z. Feng, H. Liu, X. Kan, P. Chen // *The Open Materials Science Journal*. 2011. Vol. 5. P. 204–214.
8. Charles de las Casas, Wenzhi Li. A review of application of carbon nanotubes for lithium ion battery anode material // *Journal of Power Sources*. 2012. Vol. 208. P. 74–85.
9. Prem Kumar T., Sri Devi Kumari T., Manuel Stephan A. Carbonaceous anode materials for lithium-ion

batteries – the road ahead // Journal of the Indian Institute of Science. 2009. Vol. 89:41. P. 393–424.

10. ZHOU Jing Jing, ZHOU WeiWei, GUAN Chun Mei, SHEN JingQin, OUYANG Chu Ying, LEI Min Sheng, SHI SiQi1, TANG Wei Hua. First-principles study of lithium intercalated bilayer graphene // Science China – Physics, Mechanics & Astronomy. 2012. Vol. 55. № 8. P. 1376–1382.

11. Kubota Y., Ozawa N., Nakanishi H., Kasai H. Quantum States and Diffusion of Lithium Atom Motion on a Graphene // Journal of the Physical Society of Japan. 2010. Vol. 79. № 1. 6 p.

12. Yao F., Günes F., Huy Quang Ta, Seung Mi Lee, Seung Jin Chae, Kyeu Yoon Sheem, Costel Sorin Cojocaru, Si Shen Xie, Young Hee Lee. Diffusion Mechanism of Lithium Ion through Basal Plane of Layered Graphene // Journal of the American Chemical Society. 2012. Vol. 134. P. 8646–8654.

13. Chandrakumar K. R. S., Ghosh Swapan K. Alkali-Metal-Induced Enhancement of Hydrogen Adsorption in C60 Fullerene: An ab Initio Study // Nano Letters. 2008. Vol. 8. № 1. P. 13–19.

14. Электронная и атомная структура изомеров эндо- и экзоэдральных комплексов фуллеренов с двумя атомами лития / А. А. Кузубов, П. В. Аврамов, С. Г. Овчинников и др. // Физика твердого тела. Вып. 9. Т. 43. 2001. С. 1721–1726.

15. Теоретическое исследование тороидальных форм углерода и их эндоэдральных комплексов с литием / А. А. Кузубов, П. В. Аврамов, С. Г. Овчинников и др. // Физика твердого тела. Вып. 10. Т. 43. 2001. С. 1904–1910.

16. Li4C60: A Polymeric Fulleride with a Two-Dimensional Architecture and Mixed Interfullerene Bonding Motifs / S. Margadonna, D. Pontiroli, M. Belli, T. Shiroka, M. Ricco, M. Brunelli // J. Am. Chem. Soc. 2004. Vol. 126. № 46. P. 15032–15033.

17. New Polymeric Phase in Low-Doped Lithium Intercalated Fullerides / D. Pontiroli, M. Ricco, T. Shiroka, M. Belli, G. Ruani, D. Palles, S. Margadonna // Fullerene, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2006. Vol. 14. P. 391–400.

18. Clustering and polymerisation of Li15C60 / T. Shiroka, M. Ricco, F. Barbieri, E. Zannoni, M. Tomaselli // Физика твердого тела. 2002. Вып. 3. Т. 44. С. 498–501.

19. Laser-induced transformation of Li4C60 and Na4C60 polymers into metallic monomeric fulleride phases / M. Yao, V. Pischedda, T. Wagberg, B. Sundqvist, Sylvie Le Floch, Alfonso San Miguel // Chemical Physics Letters. 2010. Vol. 489. P. 64–68.

20. Adams G. B., Page J. B. Theoretical Studies of Raman Spectra for Planar Polymerized C60 // Phys. Stat. Sol. (b). 2001. 226 (1). P. 95–106.

21. Белов О. И., Стародубцев Н. Ф., Нижниковский Е. А. Исследование перспектив применения фуллеренов в электродах литий-ионных аккумуляторах // Журнал научно-производственного предприятия «Квант». 2010. Вып. 27. С. 28–32.

22. Structural and Physical Properties of Lithium Fullerides Li_xC₇₀ / H. Kumada, M. Kobayashi, Y. Akahama, H. Kawamura // Conference Proceedings. 2001. P. 389–392.

23. Yasukawa M., Yamanaka S. Synthesis of Li_xC₆₀ (x = 1–28) fullerides under high-pressure and high-temperature conditions and their electrical properties // Chemical Physics Letter. 2001. Vol. 341. P. 467–475.

24. Superionic Conductivity in the Li4C60 Fulleride Polymer / M. Ricco, M. Belli, M. Mazzani, D. Pontiroli // Physical review letters. 2009. Vol. 102.

25. Uthaisar Ch., Barone V., Peralta J. E. Lithium adsorption on zigzag graphene nanoribbons // Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 106.

26. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals // Phys. Rev. 1993. Vol. B47.

27. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal–amorphous-semiconductor transition in germanium // Phys. Rev. 1994. Vol. B49. P. 14251.

28. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // Phys. Rev. 1996. Vol. B54. P. 11169.

29. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // Phys. Rev. 1964. Vol. 136. P. 864.

30. Kohn W., Sham L. J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects // Phys. Rev. 1965. Vol. 140. P. 1133.

31. Blöchl P. E. Projector augmented-wave method // Phys. Rev. B 1994. Vol. 50. P. 17953.

32. Kresse G., Joubert J. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented wave method // Phys. Rev. B 1999. Vol. 59. P. 1758.

33. Grimme S. Semiempirical GGA-type density functional constructed with a long-range dispersion correction // J. Comp. Chem. 2006. Vol. 27. P. 1787.

34. Vanderbilt D. Negative-Curvature Fullerene Analog of C60 // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 68. P. 511–513.

© Кузубов А. А., Елисеева Н. С., Федоров А. С., Федоров Д. А., Тихонова Л. В., 2013

УДК 536.6

**ТЕПЛОЕМКОСТЬ, ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ И КАЛОРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
В КОМПОЗИТЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК-ФЕРРОМАГНЕТИК $0,82(\text{PbTiO}_3) - 0,18(\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3)^*$**

Е. А. Михалёва, Н. В. Михашенок, М. С. Молокеев, И. Н. Флёров, М. В. Горев

Институт физики имени Л. В. Киренского
Россия, 660036 г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38. E-mail: katerina@iph.krasn.ru

Выполнены измерения теплоемкости и теплового расширения керамического композита $0,82(\text{PbTiO}_3) - 0,18(\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3)$ в широком интервале температур. Исследовано взаимное влияние сегнетоэлектрического и ферромагнитного компонентов на электро-, магнето- и барокалорическую эффективность материала в области фазовых переходов.

Ключевые слова: теплоемкость, тепловое расширение, фазовые переходы, электро-, магнето- и барокалорические эффекты.

**HEAT CAPACITY, THERMAL EXPANSION AND CALORIC EFFECTS
IN FERROELECTRIC-FERROMAGNETIC COMPOSITE $0,82(\text{PbTiO}_3) - 0,18(\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3)$**

E. A. Mikhaleva, N. V. Mikhashenok, M. S. Molokeev, I. N. Flerov, M. V. Gorev

Kirenskiy Institute of Physics
50 Akademgorodok, building 38, Krasnoyarsk, 660036 Russia. E-mail: katerina@iph.krasn.ru

Heat capacity and thermal expansion measurements on ceramic composite $0,82(\text{PbTiO}_3) - 0,18(\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3)$ were performed at a wide temperature range. The cross impact of ferroelectric and ferromagnetic components on electro-, magneto- and barocaloric efficiency of the material was studied in phase transition regions.

Keywords: heat capacity, thermal expansion, phase transitions, electro-, magneto- and barocaloric effects.

В последнее время интенсифицировались поиски принципиально новых высокоэффективных, технологичных и экологически безопасных способов охлаждения на самых разных уровнях температур – от криогенных до комнатных. В частности, это касается области использования радиоэлектронных устройств, работающих при низких температурах, с целью уменьшения тепловых шумов и использования специфических свойств твердых тел при этих температурах. С другой стороны, в связи с быстрым развитием микроэлектро-механических систем (MEMS) и информационных технологий, MEMS оборудование, такое как микросенсоры и актюаторы, портативные интегральные системы (ноутбук РС, персональный стереопроигрыватель и т. д.) становятся все в более возрастающей степени миниатюрными и многофункциональными. При этом неизбежно происходит рост плотности тока в интегральных схемах. Во всех случаях возникают более высокие требования к охлаждающим системам (миниатюрность, длительный срок службы и надежность), которые не могут быть удовлетворены исключительно посредством находящихся в настоящее время в широком обращении устройств.

Использование в качестве альтернативных охлаждающих устройств компактных систем на основе эффекта Пельтье оказалось непродуктивным ввиду их низкой

эффективности. Более технологичными и эффективными в последнее время считаются методы охлаждения, основанные на использовании калорических эффектов (КЭ) в твердых телах (хладагентах) – магнетиках и диэлектриках, в частности, претерпевающих фазовые переходы [1; 2]. В общем виде КЭ связаны с обратимым изменением энтропии или температуры термодинамической системы при изменении обобщенных внешних полей (электрического, магнитного, механических напряжений) соответственно в изотермическом или адиабатном процессах. Эффект охлаждения возникает за счет взаимодействия внешнего поля с микроструктурными составляющими твердого тела: доменами, ионами, ядрами. Благодаря высокой плотности твердых тел рефрижераторы на их основе могут быть более компактными по сравнению с традиционными холодильными установками, а в случае необходимости – действительно миниатюрными. И тогда использование твердых тел в качестве хладагента в криогенных устройствах становится не только целесообразным, но и предпочтительным [2; 3]. Пик калорической эффективности наблюдается в области фазовых переходов различной физической природы. Если же материал испытывает ряд превращений разной природы то, благодаря одновременному или последовательному приложению соответствующих внешних полей, калорическая эффективность может возрастать. Одно из направлений

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013г. (№ 8379) и РФФИ (грант 12-02-31253 мол_а_2012).

поиска подобных твердотельных хладагентов связано с исследованием твердых растворов и композитных материалов. Так обнаружено, что при добавлении классического сегнетоэлектрика PbTiO_3 к релаксорным системам можно получить материалы, обладающие очень высокими значениями пьезоэлектрических коэффициентов [4] и значительной электрокалорической эффективностью [5]. Недавно показано [6], что природа последнего явления может быть связана с высокой электрокалорической эффективностью PbTiO_3 .

В настоящей работе определены параметры электро- (ЭКЭ), магнето- (МКЭ) и баро- (БКЭ) калорических эффектов в объемном композите $0,82(\text{PbTiO}_3) - 0,18(\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3)$ посредством прямых измерений и путем анализа теплоемкости и теплового расширения, измеренных в широком интервале температур. Материал приготовлен на основе титаната свинца и манганита лантана-свинца, испытывающих соответственно сегнетоэлектрический и ферромагнитный фазовые переходы [6; 7].

Образцы приготовлены по традиционной керамической технологии из исходных соединений PbTiO_3 и $\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3$, которые смешивались в пропорции 82:18. Измерения теплоемкости $C_p(T)$ от 350 до 970 К проведены на синхронном термоанализаторе STA 449 C Jupiter, а в низкотемпературной области (100–350 К) с помощью адиабатического калориметра. Тепловое расширение исследовалось на dilatометре NETZSCH DIL-402C в температурном диапазоне 270–950 К.

Результаты калориметрических измерений представлены на рис. 1, а. Аномалия теплоемкости, связанная с фазовым переходом в сегнетоэлектрическом компоненте, обнаружена при $T_0^{\text{FE}} = 766$ К, что незначительно отличается от $T_0^{\text{FE}} = 763$ К в чистом PbTiO_3 [6]. С другой стороны, переход в ферромагнитную фазу реализуется при значительно более низкой температуре $T_0^{\text{FM}} = 316$ К, чем в $\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3$ [7]. Для определения интегральных характеристик фазовых переходов выполнено разделение теплоемкости на регулярную составляющую (решеточную теплоемкость) C_L и аномальные вклады ΔC_p , связанные с возникновением поляризации и намагниченности соответственно при T_0^{FE} и T_0^{FM} . С этой целью экспериментальные данные $C_p(T)$ вдали от T_0^{FE} и T_0^{FM} были аппроксимированы уравнением, содержащим функции Дебая и Эйнштейна и полином второй степени, учитывающий разность $C_p - C_v$. Зависимость $C_L(T)$ показана штриховой линией на рис. 1, а. Связанные с фазовыми переходами изменения энтропии $\Delta S_0 = (\Delta C_p/T)dT$ составили $\Delta S_0^{\text{FE}} = 5,5 \pm 0,5$ Дж/моль·К и $\Delta S_0^{\text{FM}} = 2,0 \pm 0,3$ Дж/моль·К.

Температурная зависимость коэффициента линейного теплового расширения α композита, измеренная в режимах нагрева и охлаждения, показана на рис. 2, а. Видно, что, как и для теплоемкости, аномальное поведение α , связанное с сегнетоэлектрическим фазовым переходом, наблюдается в широкой области температур. Температура минимума коэффициента расширения $T_{\min} = 764$ К и величина температурного гистерезиса $\delta T_0 = 15$ К согласуются с параметрами, определенными в калориметрических измерениях. В то же

время переход в ферромагнитную фазу в dilatометрических экспериментах зарегистрировать не удалось.

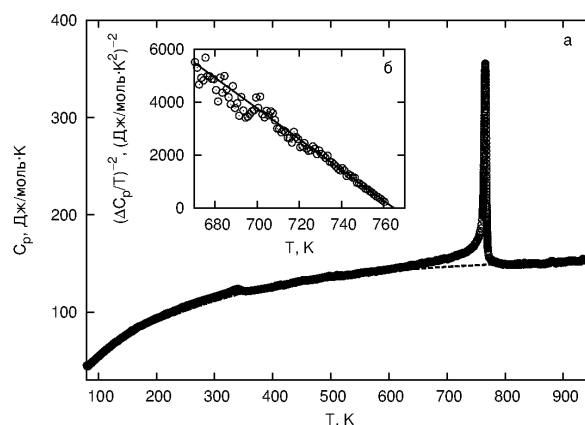


Рис. 1. Температурная зависимость молярной теплоемкости $0,82(\text{PbTiO}_3) - 0,18(\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3)$, штриховая линия – решеточная теплоемкость (а).

Поведение аномальной теплоемкости ниже T_0^{FE} в рамках термодинамической теории (б)

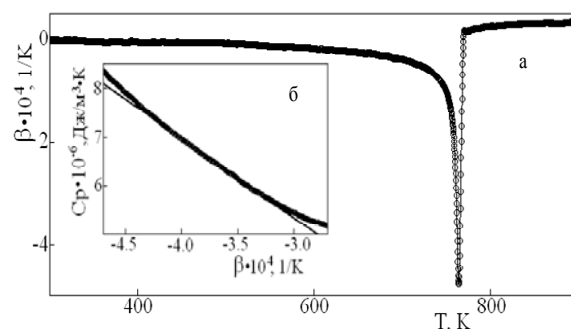


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента линейного теплового расширения (а); соотношение между C_p и β ниже T_0^{FE} в соответствии с уравнением Пиппарда (б)

Анализ зависимостей $C_p(T)$ и $\alpha(T)$ позволил определить начальный наклон линии фазового перехода $Pm-3m \rightarrow P4mm$ (в компоненте PbTiO_3) на диаграмме $T-p$, характеризуемый барическим коэффициентом $(dT_0/dp)_{p=0}$. В соответствии с уравнением Пиппарда [8] соотношение между $C_p(T)$ и $\beta(T)$ удовлетворительно описывается линейной зависимостью $C_p = \beta VT_0(dT_0/dp)_{p=0} + \text{const}$. Здесь $\beta = 3\alpha$ – коэффициент объемного теплового расширения. Из рис. 2, б видно, что ожидаемая зависимость между C_p и β выполняется при $T < T_0^{\text{FE}}$ в интервале 750–761 К и соответствует величине барического коэффициента $(dT_0^{\text{FE}}/dp)_{p=0} = -4,7$ К/кбар.

Несомненный интерес представляет определение калорических эффектов разной физической природы в композите сегнетоэлектрик-ферромагнетик и сравнение их с ранее полученными нами сведениями о ЭКЭ и БКЭ в PbTiO_3 [6]. Такого рода сведения позволяют установить характер взаимного влияния сегнетоэлектрического и ферромагнитного компонентов.

Как и в случае PbTiO_3 [6], ЭКЭ в композите был определен с использованием электрического уравнения состояния. Анализ калориметрических дан-

ных в рамках термодинамического потенциала [9], $\Delta\Phi = A_T(T - T_C)P^2 + BP^4 + CP^6$ (P – спонтанная поляризация), показал, что аномальная теплоёмкость $\Delta C_p/T(T)$ композита при $T < T_0^{\text{FE}}$ удовлетворительно описывается уравнением $(\Delta C_p/T)^{-2} = (2\sqrt{B^2 - 3A_T C/A_T^2})^2 + 12C(T_0 - T)/A_T^3$, являющимся одним из следствий теории [10]. Квадрат обратной относительной избыточной теплоемкости оказался линейной функцией температуры в весьма широком интервале температур 675–755 К (рис. 1, б). Данные о зависимости $(\Delta C_p/T)^{-2}(T)$ и константе Кюри–Вейсса $C_{\text{К-В}} = 5,7 \cdot 10^5$ К позволили определить коэффициенты потенциала: $A_T = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, $B = -2,2 \cdot 10^{-8} (\text{Дж/моль})^{-1}$, $C = 8,5 \cdot 10^{-13} (\text{Дж/моль})^{-2}$. На основе анализа полученных сведений в рамках электрического уравнения состояния $-E = 2A_T(T - T_C)P + 4BP^3 + 6CP^5$ построена термодинамическая поверхность P - E - T . Интенсивный $\Delta T_{\text{AD}}^{\text{ECE}}$ ЭКЭ, представляющий собой обратимое изменение температуры сегнетоэлектрика при наложении/снятии внешнего электрического поля в адиабатных условиях, можно определить путем анализа этой поверхности в соответствии с уравнением $\Delta T_{\text{AD}}^{\text{ECE}} = -(T/C_{p,E})(\partial P/\partial T)_{p,E} dE$ [2]. Из рис. 3 следует, что максимальная величина интенсивного ЭКЭ $\Delta T_{\text{AD}}^{\text{ECE}}$ в композите хоть и уменьшилась по сравнению с PbTiO_3 , но осталась достойной внимания и превосходящей соответствующие величины в других сегнетоэлектриках [1; 6]. Характер поведения ЭКЭ в зависимости от напряженности электрического поля при постоянной температуре остался неизменным – с ростом E величина $(\Delta T_{\text{AD}}^{\text{ECE}})_{\text{MAX}}$, по-видимому, стремится к насыщению.

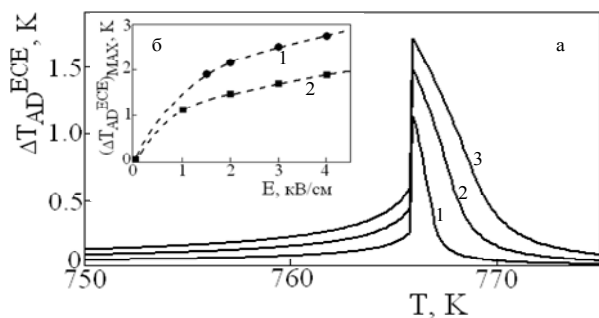


Рис. 3. Температурная зависимость интенсивного ЭКЭ для композита в электрических полях (а) 1 (1), 2 (2), 3 (3) кВ/см. Влияние электрического поля на $(\Delta T_{\text{AD}}^{\text{ECE}})_{\text{MAX}}$ в PbTiO_3 (1) и композите (2) (б)

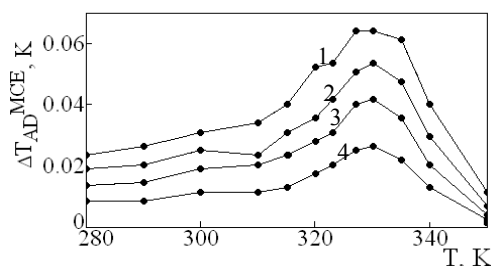


Рис. 4. Результаты исследования интенсивного МКЭ для композита в магнитных полях $H = 5,3$ (1); 4,2 (2), 3,3 (3); 2,2 (4) кЭ

Несмотря на небольшое содержание магнитного компонента, мы выполнили прямые измерения интенсивного МКЭ на композите в области магнитного фазового перехода. Результаты исследований в интервале 280–350 К для нескольких магнитных полей представлены на рис. 4. Максимальная величина эффекта $\Delta T_{\text{AD}}^{\text{MCE}}$ в поле 5,3 кЭ невелика, но следует обратить внимание, что она медленно уменьшается с понижением температуры в широком интервале. Последнее обстоятельство свидетельствует о довольно высокой интегральной магнетокалорической интенсивности материала, определяемой площадью под пиком $\Delta T_{\text{AD}}^{\text{MCE}}(T)$.

Ввиду незначительной аномалии теплоемкости и соответствующего изменения энтропии ΔS_0^{FM} при переходе в ферромагнитную фазу барокалорическая эффективность композита $0,82(\text{PbTiO}_3) - 0,18(\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3)$ исследована только в области сегнетоэлектрического перехода. Интенсивный и экстенсивный БКЭ представляют собой обратимые изменения температуры $\Delta T_{\text{AD}}^{\text{BCE}}$ (при $S = \text{const}$) и энтропии ΔS^{BCE} (при $T = \text{const}$) под влиянием гидростатического давления. Определение БКЭ выполнено на основе подхода, использованного в [6], который основан на анализе диаграммы «энтропия – температура – давление S - T - p », построенной с учетом данных о барическом коэффициенте $(dT_0/dp)_{p=0}$ и полной энтропии композита $S(T) = \int C_p(T) dT$.

В соответствии со знаком $dT_0^{\text{FE}}/dp < 0$ БКЭ в $0,82(\text{PbTiO}_3) - 0,18(\text{La}_{0,7}\text{Pb}_{0,3}\text{MnO}_3)$, также как и в PbTiO_3 [6], является обратным – с ростом давления температура понижается, а энтропия растет. На рис. 5 а, б показано изменение с температурой величин $\Delta T_{\text{AD}}^{\text{BCE}}$ и ΔS^{BCE} для композита и керамики PbTiO_3 .

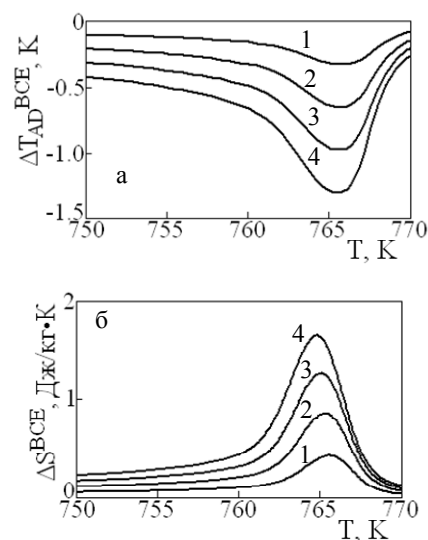


Рис. 5. БКЭ в области сегнетоэлектрического фазового перехода в композите при давлении $p = 100$ (1); 200 (2), 300 (3); 400 (4) бар

Видно, что в композите почти вдвое уменьшился интенсивный эффект, но при этом увеличился экстенсивный параметр на ~ 20 %. Несмотря на это, барока-

лорическую эффективность композита можно уверенно считать высокой, так как давление для реализации изменения температуры на 1 К остается очень низким ~ 350 бар.

Сопоставление характеристик фазовых переходов T_0 и $(dT_0/dp)_{p=0}$ позволяет считать, что наиболее сильное влияние оказывает сегнетоэлектрическое состояние компонента PbTiO_3 на переход в ферромагнитную фазу в компоненте $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ при T_0^{FM} . Это выражается также в увеличении экстенсивного МКЭ и в значительном подавлении аномалии коэффициента теплового расширения, которую не удалось зарегистрировать. Наличие в композите парамагнитной фазы способствует росту восприимчивости к давлению температуры T_0^{FE} . Таким образом, одним из наиболее важных результатов исследований связан с установлением возможности реализации в объемном композите $0,82(\text{PbTiO}_3) - 0,18(\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3)$ заметных калорических эффектов разной физической природы при довольно низких полях (электрическом, магнитном, механических напряжений).

Библиографические ссылки

1. Синяевский Ю. В. Электрокалорические рефрижераторы – перспективная альтернатива современным низкотемпературным установкам // Химическое и нефтяное машиностроение. 1995. № 6. С. 5–12.
2. Tishin A. M., Spichkin Y. I. The Magnetocaloric Effect and its Applications. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2003.
3. Radebaugh R., Lawless W. N., Siegwirth J. D.,

Morrow A. J. Feasibility of electrocaloric refrigeration for the 4–15 K temperature range // Cryogenics. 1979. № 4. P. 187–208/

4. Park S. E., Shrout T. R. Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. P. 1804–1811.

5. Valant M., Dunne L. J., Axelsson A. K., Alford N. M., Manos G., Perantie J., Hagberg J., Jantunen H., Dabkowski A. Electrocaloric effect in a ferroelectric $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ single crystal. // Phys. Rev. B 2010. Vol. 81. P. 214110 (5pp).

6. Калорические характеристики PbTiO_3 в области сегнетоэлектрического фазового перехода / Е. А. Михалёва, И. Н. Флёров, М. В. Горев и др. // ФТТ. 2012. Т. 54. С. 1719–726.

7. Volkov N., Petrakovskii G., Böni P., Clementyev E., Patrin K., Sablina K., Velikanov D., Vasiliev A. Intrinsic magnetic inhomogeneity of Eu substituted $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ single crystals // JMMM. 2007. Vol. 309. P. 1–6.

8. Парсонидж Н., Л. Стейвли Л. Беспорядок в кристаллах. М.: Мир, 1982.

9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964.

10. Александров К. С., Флёров И. Н. Области применимости термодинамической теории для структурных фазовых переходов близких к трикритической точке. // ФТТ. 1979. Т. 21. С. 327–336.

© Михалёва Е. А., Михашенок Н. В., Молокеев М. С., Флёров И. Н., Горев М. В., 2013

УДК 549:548.4

АНТАГОНИЗМ ФАЗ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ

В. В. Онуфриенко

Сибирский федеральный университет
Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28. E-mail: VOnufriynok@yandex.ru

Анализируется фазовый состав многокомпонентных систем. При их исследовании обнаружен эффект фазового антагонизма, проявляющийся в виде корреляции между процентным содержанием отдельных фаз в многокомпонентной смеси, при этом процентное содержание других фаз оставалось практически неизменным. Примером таких фаз в многокомпонентной фазовой смеси являются, на основе экспериментальных исследований, пары моноклинный пирротин – сомолюнокит, гетит – троилит, гексагональный пирротин различного состава – моноклинный пирротин.

Ключевые слова: фазовый состав, рентгеновская дифрактограмма, фазовая диаграмма, антагонизм фаз, пирротин, сомолюнокит.

ANTAGONISM OF PHASES IN MULTI-COMPONENT MIXTURES

V. V. Onufrienok

Siberian Federal University
28 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: VOnufriynok@yandex.ru

The phase composition of multi-component systems is analyzed. In the process of the study the effect of phase antagonism was observed, the effect revealed itself in the form of correlation between the percentage composition of

individual phases in a multi-component mixture, with the percentage composition of the other phases remaining almost unchanged. On the basis of experimental studies, the examples of such phases in multi-phase mixtures are pairs of monoclinic pyrrhotite and somolnokit, goethite and troilite, hexagonal pyrrhotite of different composition and monoclinic pyrrhotite.

Keywords: phase composition, X-ray diffraction, phase diagram, phase antagonism, pyrrhotite, somolnokit.

Многокомпонентные смеси и их физические свойства имеют важное как практическое, так и теоретическое значение в области решения различных задач материаловедения. Например, в работе Биронта [1] отмечаются особенности физических свойств многокомпонентных сплавов, используемых для высокотемпературной защиты материалов. Состав цемента представляет собой многокомпонентную систему измельченных минералов, от химического и фазового состава которых во многом зависит его качество [2]. В практической минералогии исследуются часто многофазные образцы породы, свойства которой важны как для понимания условий ее образования, так и для прогнозирования и поиска полезных ископаемых, значение которых для экономики и развития промышленности трудно переоценить [3]. Хотя фазовый состав многокомпонентных систем, как правило, детально исследуется, однако взаимодействие фаз в таких системах практически не изучено.

При исследовании процессов изотермического окисления в атмосфере многофазных образцов сульфидов железа наблюдалась зависимость процентного содержания одних фаз от других. Например, процентное содержание сомольнокита, состав которого определяется формулой $\text{Fe}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})$, находилось в зависимости от процентного содержания моноклинного пирротина (Fe_7S_8), в то время как процентное содержание в образце других фаз практически не изменялось. На рис. 1 представлены рентгеновские дифрактограммы, доказывающие это явление. Действительно, характерные для пирротина рентгеновские рефлексы уменьшаются в зависимости от возрастания рефлексов, характерных для структуры сомольнокита. Во всех этих образцах присутствовал также пирит, обладающий кубической структурой, процентное содержание которого не зависело от содержания сомольнокита или пирротина в образцах. Аналогичное явление наблюдается для систем, содержащих троилит (FeS) и гетит ($\text{FeO}(\text{HO})$). В таких многофазных системах наличие троилита находилось в непосредственной зависимости от содержания в образцах гетита. Во всех образцах данной системы присутствовал моноклинный пирротин, содержание которого не коррелировало с фазой гетита или троилита [4].

Эффект фазового антагонизма наблюдался также у сульфидов железа, переведенных после синтеза в стабильное фазовое состояние. Пирротин обладает кристаллической структурой типа NiAs (B-8). Базисная элементарная ячейка такой структуры содержит два катиона и два аниона (структура с базисной элементарной ячейкой 1C). Отличие от стереометрического состава объясняется тем, что часть катионных позиций вакантна. Катионные вакансии могут иметь различного рода упорядочения в кристаллической струк-

туре, в результате этого могут возникать различные сверхструктуры.

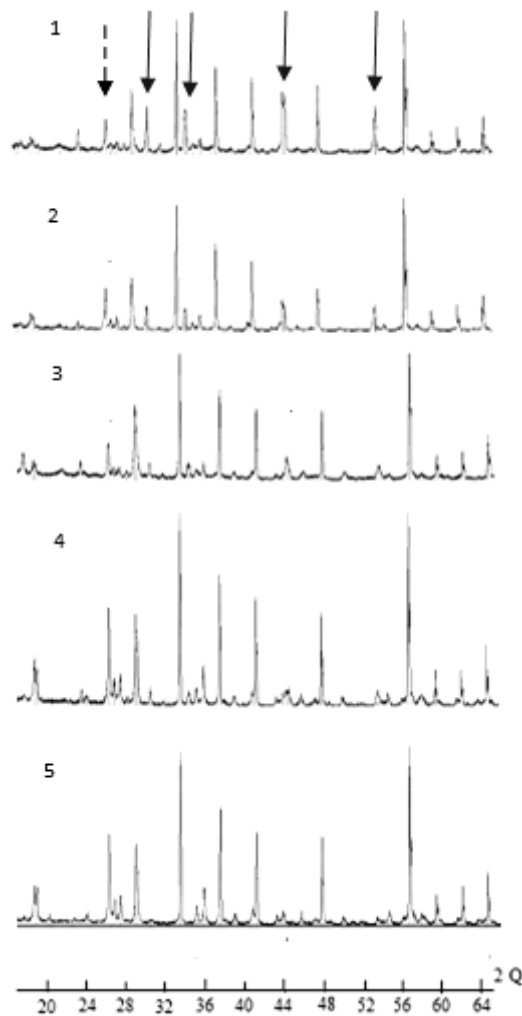


Рис. 1. Характерные дифрактограммы образцов, содержащие сомольнокит и моноклинный пирротин. Сплошной стрелкой показаны рефлексы пирротина, пунктирной – сомольнокита

У исходных (непосредственно после сухого синтеза в вакууме ~ 1 Па при температуре 1000°C) сульфидов железа в узкой области $\text{S/Fe} \approx 1.00$ (50 % атомов железа) фиксировалась методом РФА одна антиферромагнитная фаза β_1 (FeS – троилит). Кристаллическая структура образцов контролировалась в лаборатории рентгеноструктурного анализа СФУ на дифрактометре XRD-7000S фирмы Shimadzu с использованием рентгеновского излучения $\text{Cu}(\text{K}_\alpha)$. Фазовый состав образцов определялся по методике, изложенной в работе Дубинина [5]. В интервале $1,00 < \text{S/Fe} < 1,03$

(соответствует от 50 до 49,3 % атомов железа в исходных образцах) определялись две антиферромагнитные фазы – β_1 и β_2 ($\text{Fe}_{0,972}\text{S}$), отличающиеся параметрами элементарной ячейки. Фазы β_1 и β_2 по оси c отличаются в два раза – 2С и 1С соответственно. Установлено, что постепенно изменяется относительное процентное соотношение этих фаз в зависимости от содержания серы в исходных образцах. При $\text{S/Fe} = 1.03$ фаза β_1 исчезает и остается только β_2 ($\text{Fe}_{0,972}\text{S}$).

По мере увеличения содержания серы (от 49,3 до 47,6 % атомов железа в исходных образцах) остается только одна фаза типа β_2 , однако параметры элементарной ячейки такой фазы плавно изменяются в зависимости от процентного содержания атомов железа в ней. Это соответствует интервалу $1,03 < x < 1,10$ и составам $\text{Fe}_{0,972}\text{S} - \text{Fe}_{0,909}\text{S}$.

По мере дальнейшего увеличения содержания серы (от 47,3 до 45,9 % атомов железа в исходных образцах) наряду с фазой β_4 возникает фаза β_5 , обладающая моноклинной кристаллической структурой, в которой катионные вакансии полностью упорядочены в четных базисных плоскостях.

Пирротины, содержащие максимальное процентное содержание серы, обладали составом $\text{Fe}_{0,847}\text{S}$. По

мере дальнейшего увеличения содержания серы (от 45,9 % атомов железа в образцах) возникает фаза γ , обладающая кубической гранцентрированной кристаллической структурой. Она имеет состав FeS_2 (пирит). Постепенно изменяется относительное процентное соотношение этих фаз в зависимости от содержания серы в исходных образцах. Таким образом, у сульфидов железа, находящихся в метастабильном фазовом состоянии явление фазового антагонизма не наблюдалось.

В результате рентгеновских исследований структуры и фазового состава пирротинотин в стабильном фазовом состоянии, полученных после 29-летней выдержки, фиксировался эффект фазового антагонизма, описание которого приводится ниже.

Определено, что стабильными составами могут быть FeS , $\text{Fe}_{0,975}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,950}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,909}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,875}\text{S}$. На рис. 2 представлена фазовая диаграмма пирротинотин в стабильном фазовом состоянии. Из анализа диаграммы следует, что стабильные пирротины образуют очень узкие области гомогенности. Стабильные фазовые состояния пирротина соответствуют составам $\sim\text{FeS}$, $\text{Fe}_{0,975}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,950}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,909}\text{S}$, $\text{Fe}_{0,875}\text{S}$ – между ними смесь $\text{FeS} + \text{Fe}_{0,875}\text{S}$.

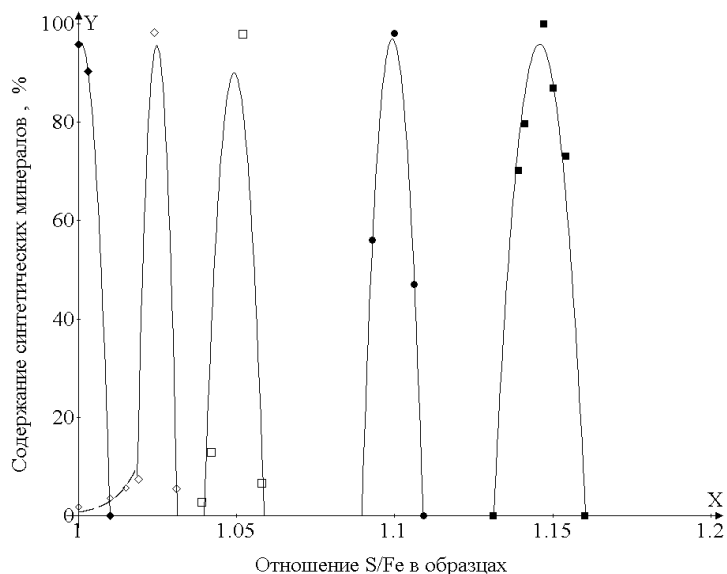


Рис. 2. Фазовая диаграмма пирротинотин в стабильном фазовом состоянии

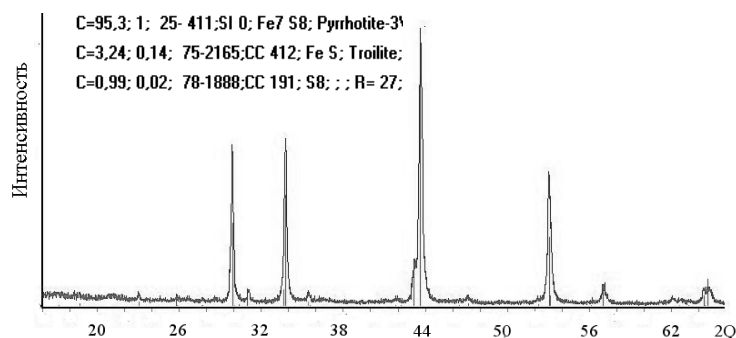


Рис. 3. Дифрактограмма образца с соотношением $\text{S/Fe} = 1,130$

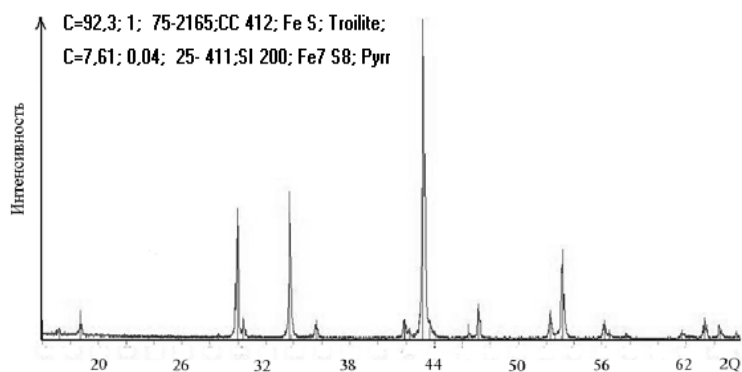


Рис. 4. Дифрактограмма образца с соотношением S/Fe = 1,01

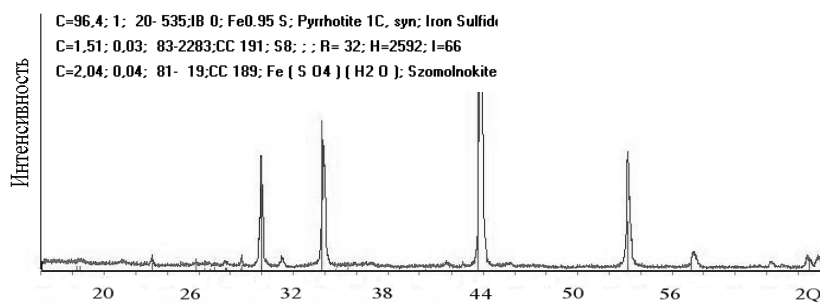


Рис. 5. Дифрактограмма пирротина состава $\text{Fe}_{0.950}\text{S}$ (S/Fe = 1,052)

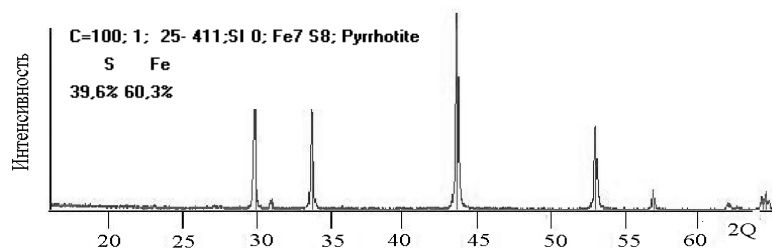


Рис. 6. Рентгеновская дифрактограмма моноклинного пирротина состава $\text{Fe}_{0.875}\text{S}$ (S/Fe = 1,145)

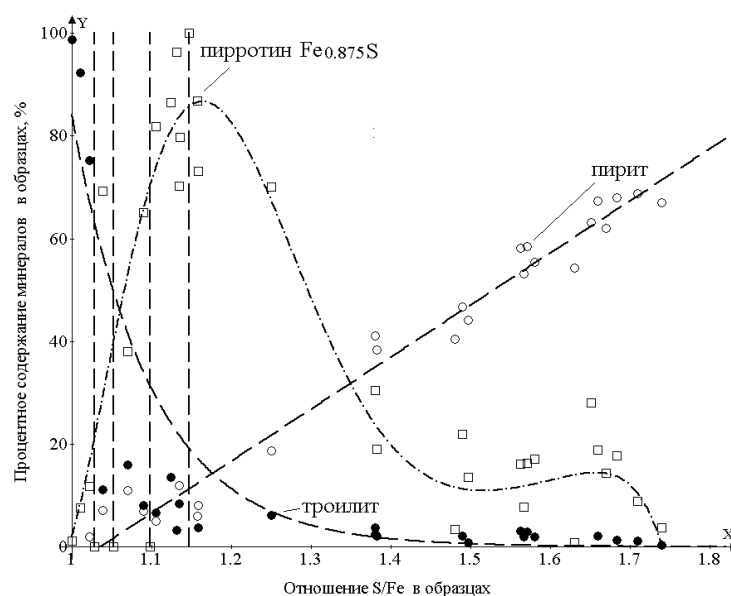


Рис. 7. Диаграмма стабильных фазовых соотношений пирротина. Пунктиром выделены гомогенные составы

Между стабильными фазовыми областями образцы состояли преимущественно из смеси троилита и моноклинного пирротина с образованием, по мере увеличения содержания серы, пирита.

При небольшом смещении по составу в левую сторону от моноклинного пирротина формировался троилит (рис. 3), а при небольшом смещении вправо от троилита формировался моноклинный пирротин (рис. 4). Это представляет интерес, поскольку при отсутствии фазового антагонизма логично было бы ожидать при смещении вправо от троилита смесь троилита (FeS) и гексагонального пирротина состава $\text{Fe}_{0,975}\text{S}$, а при смещении влево от моноклинного пирротина состава $\text{Fe}_{0,875}\text{S}$ – смесь моноклинного пирротина и гексагонального пирротина состава $\text{Fe}_{0,909}\text{S}$.

Таким образом, промежуточные фазы формировались только в достаточно узком интервале составов при достаточно точном попадании в соотношения S/Fe , при этом все остальные фазы исчезали. На рис. 5 представлена, для примера, дифрактограмма гексагонального пирротина состава $\text{Fe}_{0,950}\text{S}$ ($\text{S/Fe} = 1,052$). Причем слева и справа от этого соотношения реализуется смесь $\text{Fe}_{0,875}\text{S} + \text{FeS}$ с различным соотношением этих компонент в зависимости от S/Fe . Ясно, что при смещении вправо ожидается (если отсутствует антагонизм фаз) смесь $\text{Fe}_{0,950}\text{S} + \text{Fe}_{0,909}\text{S}$, а при смещении влево – $\text{Fe}_{0,950}\text{S} + \text{Fe}_{0,975}\text{S}$. Однако эксперимент доказывает, что на практике этого не происходит. Между тем, для моноклинного пирротина и для троилита при достаточно точном попадании в соотношения серы и железа наблюдался гомогенный состав (рис. 6).

Следовательно, у сульфидов железа в стабильном фазовом состоянии наблюдался антагонизм фаз. Отметим, что подобное явление никогда ранее не описывалось в литературе.

Интерес представляет проследить фазовый состав образцов смеси троилита, пирита и моноклинного пирротина при изменении соотношения серы и железа. На рис. 7 представлена диаграмма этих фазовых соотношений в образцах. Соотношение серы и железа на диаграмме представлено по результатам рентгеновских исследований.

Фаза пирита увеличивается в образцах практически по линейному закону, но синтезировать гомогенный пирит не удалось – в образцах, обогащенных серой, всегда вместе с пиритом присутствовал пирротин с моноклинной кристаллической структурой и чистая сера. Если содержание троилита в образцах достаточно хорошо можно аппроксимировать экспоненциаль-

ной функцией, то фаза с моноклинной структурой имеет довольно сложную зависимость от соотношения серы и железа в образцах.

Экспериментально установлено, что троилит, пирит и моноклинный пирротин не обладают антагонизмом и образуют смесь в широком диапазоне составов. Следует также отметить, что фаза β_2 ($\text{Fe}_{0,975}\text{S}$) имеет меньшую степень антагонизма к фазе β_2 (троилит), по сравнению с другими фазами гексагонального пирротина. На диаграмме (рис. 2) это проявляется в виде частичного перекрытия областей совместного существования этих фаз.

Кратко подведем итоги данной работы: спектр равновесных фазовых состояний уменьшается по мере выдержки синтетического пирротина. Предложена фазовая диаграмма пирротина в стабильном фазовом состоянии, обладающая узкими областями гомогенности составов. Установлено наличие антагонизма между некоторыми равновесными фазовыми состояниями в многокомпонентной смеси (моноклинный пирротин – сомоленокит, гетит – троилит, гексагональный пирротин различного состава – моноклинный пирротин).

Библиографические ссылки

1. Особенности окисления трехкомпонентных сплавов на основе системы железо-никель – кобальт / В. С. Биронт, Т. Н. Дроздова, И. В. Блохин и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и Технологии. 2009. Т. 2. № 2. С. 139–150.
2. Broekmans A. T. M. Maarten, Pollmann H. Applied Mineralogy of Cement & Concrete. 2012.
3. Вариации фугитивности серы в рудообразующем растворе: фактор магнитной зональности золото-сульфидных месторождений / Ю. В. Колмаков, А. М. Сазонов, В. В. Врублевский и др. // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 1. С. 87–91.
4. Онуфриенко В. В. Кристаллохимические превращения в минералах, индуцируемые катионными вакансиями (на примере пирротина) : монография / Сиб. федерал. ун-т. – М. : ИТКОР, 2012.
5. Dubinin P. S., Yakimov I. S., Piksina O. E., Yakimov Y. I., Zaloga A. N. RETRIEVE – a system for XRPD phase and structure analysis / Z. Kristallogr. Suppl. 2009. Vol. 30. P. 209–211.

© Онуфриенко В. В., 2013

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМИСТОРАМИ

А. В. Серяков

ОАО «Специальное конструкторско-технологическое бюро по релейной технике»
Россия, 173000, Великий Новгород, ул. Нехинская, 55. E-mail: seryakovav@yandex.ru

Рассмотрен вопрос измерения температуры полупроводниковыми термисторами и повышения точности этих измерений. Повышение точности осуществлено за счет привязки температуры к точке перегиба (inflection point) T_{inf} функциональной зависимости логарифма сопротивления термистора и учета временного дрейфа коэффициентов разложения.

Измерение температуры, термисторы, точка перегиба функциональной зависимости логарифма сопротивления термистора, дрейф коэффициентов разложения.

THERMISTOR THERMOMETRY

A. V. Seryakov

"Special Design and Technological Bureau of Relay Technique"
55 Nekhinskaya street, Veliky Novgorod, 173000, Russia. E-mail: seryakovav@yandex.ru

In the article we consider the problem of thermistor thermometry and increase of accuracy of such measurements. Such accuracy increase is achieved by means of temperature being attached to the inflection point T_{inf} of functional dependence of the logarithm of thermistor resistance, and the account of the timing drift of expansion coefficients.

Temperature measurement, thermistors, inflection point of the functional dependence of the logarithm of thermistor resistance, drift of expansion coefficients.

Проблема измерения температуры термисторами, применяемыми при исследовании тепловых процессов в устройствах охлаждения, например в тепловых трубах среднетемпературного диапазона, исключительно актуальна. При разработке новых тепловых труб сравнение и выбор тех или иных конструктивных вариантов проводится с помощью определения теплопередающих характеристик труб, и точность измерений температуры (разностей температур) при этом является решающим фактором.

С этой целью была выполнена калибровка термистора СТЗ-19 в интервале температур $0 \div 200$ °С, путем сличения показаний в равновесных термодинамических условиях с образцовым платиновым термометром сопротивления [1; 2].

Экспериментальная часть. Термисторы СТЗ-19 представляют собой термочувствительные элементы [3–5], выполненные из керамических оксидных материалов на основе никеля, марганца и кобальта, по составу определяемые формулой $(\text{Ni}_{0,2}\text{Mn}_{0,7}\text{Co}_{0,1})_3\text{O}_4$, с отрицательным ТКС и сопротивлением при комнатной температуре около 10 кОм. Бусинка термистора СТЗ-19 тонкими платиновыми проволочками (0,01 мм) приварена к выводным траверсам (0–3 мм) и покрыта тонким слоем молибденового стекла. Термисторы имеют радиационную стойкость не хуже 2 Ус и длительную выдержку при больших g .

В качестве термометра сопротивления использован чувствительный элемент образцового платинового термометра сопротивления ПТС-10. Кварцевый

геликоид с платиновой спиралью помещен в выполненный из молибденового стекла тонкостенный цилиндрический чехол диаметром 4 мм. Перед запаиванием чехол с геликоидом был заполнен гелием при давлении, несколько меньшим атмосферного. После изготовления термометр сопротивления заново проградуирован в Сибирском институте метрологии (СНИИМ), г. Новосибирск, в интервале температур $0 \div 200$ °С. Абсолютная погрешность измерения температуры термометром оценена в 0,02 К.

Термометр с термистором размещены в массивном медном блоке цилиндрической формы, длиной 100 мм и диаметром 70 мм, установленном в вакуумной камере на специальных жестких подвесах, закрепленных на внутренней поверхности верхнего фланца камеры. В верхний фланец вакуумной камеры вварены две трубы, через одну из которых осуществляется вакуумная откачка камеры, а через другую выведены все измерительные провода. Вакуум в камере поддерживался не хуже $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па (10^{-5} тор).

Вакуумная камера с медным блоком помещена в жидкостный термостат вместимостью 40 л, температуру в котором устанавливали и длительно поддерживали с помощью регулятора ВРТ-3 и платинового термометра ТСР-III в интервале $0 \div 200$ °С с минимальной дискретностью $5 \cdot 10^{-3}$ К. Охлаждающим устройством являлся кондиционер БК-1500, штатный испаритель-теплообменник которого был заменен разветвленным медным змеевиком. Рабочей жидко-

стью в термостате служило силиконовое масло ПЭС-В2, позволяющее работать при температурах $0 \div 200$ °С. Колебания температуры внутри термостата на протяжении нескольких часов наблюдений не превышали $1 \cdot 10^{-3}$ К, дрейф температуры был менее $1 \cdot 10^{-4}$ К/час.

Проведение измерений. На протяжении нескольких лет в ИТ СО РАН, Новосибирск, была осуществлена калибровка термисторов СТЗ-19. Измерения проводились в стационарном режиме с изотермической оболочкой [6; 7], с постепенным увеличением температуры от 0 °С до 200 °С с шагом 10 °С. Длительность одного непрерывного цикла подъема температуры и проведения измерений достигала 48 часов. Всего был проведен 21 цикл измерений.

Собственно калибровка термистора состояла в точном измерении стандартным потенциометрическим методом сопротивления термистора R_C , Ом, в стационарном состоянии при заданной температуре T , К, определяемой по платиновому термометру сопротивления ПТС-10. В качестве измерителя использован компаратор напряжений Р3003 класса точности 0,0005, вместе с образцовой катушкой сопротивления Р 321 класса точности 0,01, размещенной в пассивном термостате. Источником тока служил набор батарей «Бакен» в заземленном металлическом кожухе.

Всего получено более 500 экспериментальных точек, из которых был сформирован массив исходных данных температур T и логарифмов сопротивлений термистора $\ln R_C$. Максимальная случайная погрешность измерения температуры термометром ПТС-10 не превышала $(2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ К, сопротивлений термистора $5 \cdot 10^{-4}$ Ом.

Все измерения температуры, выполненные на термометре сопротивления ПТС-10, включая калибровку в СНИИМ, сделаны при величине измерительного тока 1 мА ($1 \cdot 10^{-3}$ А), и выделяемая тепловая мощность равна $W_{\text{ПТС}} = (10 \div 17) \cdot 10^{-6}$ Вт.

На рис. 1 приведены результаты одного цикла измерений сопротивления термистора R_C в зависимости от температуры, при этом для удобства дальнейшего анализа график представлен в виде функции обратной

температуры $10^4/T$, 1/К, от $\ln R_C$. Эта зависимость близка к линейной, но в области повышенных температур $T \sim 473$ К, где $\ln R_C \sim 4 \div 5$, и в области пониженных температур $T \sim 273$ К, где $\ln R_C \sim 9 \div 10$, наблюдаются отклонения. При средних температурах, в интервале значений $\ln R_C \sim 6 \div 8$, возможно существование точки перегиба.

Рассматривая датчик температуры как систему со сосредоточенными параметрами, уравнение термистора записывают следующим образом [1; 2]:

$$T_C + \tau_C \cdot \dot{T}_C = \frac{W_C}{K_C} + T_0; \quad \tau_C = \frac{C_C}{K_C}, \quad (1)$$

где T_C – температура термистора, К; $\dot{T}_C$ – производная по времени температуры термистора при динамическом режиме измерений, τ_C – характерное время запаздывания термистора, с; W_C – выделяемая на термисторе электрическая мощность, Вт; K_C – коэффициент теплопередачи между термистором и медным блоком, Вт/К; T_0 – измеряемая термометром ПТС-10 температура медного блока или, например, тепловой трубы τ – время, с; C_C – теплоемкость термистора, Дж/К.

Решением уравнения (1) является выражение (2) [8], в котором в момент времени $\tau = \tau^*$

$$T_C(\tau) = T_C^* \cdot \exp\left(-\frac{\tau - \tau^*}{\tau_C}\right) + \left(\frac{W_C}{K_C} + T_0\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau - \tau^*}{\tau_C}\right)\right] \quad (2)$$

температура термистора считается известной и равной T_C^* .

Электрическая мощность W_C , выделяемая на термисторе измерительным током, при всех калибровочных испытаниях постоянна и равна $20 \cdot 10^{-6}$ Вт, и перегрев термистора ΔT_C вычисляются по формуле

$$\Delta T_C = \frac{W_C}{K_C} = \tau_C \cdot \frac{W_C}{C_C}. \quad (3)$$

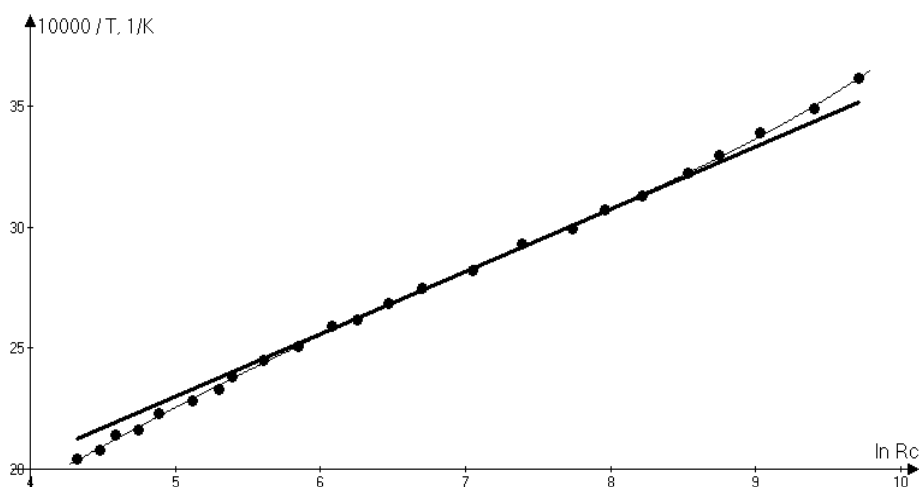


Рис. 1. Экспериментальная зависимость логарифма сопротивления термистора СТЗ-19 от обратной температуры $10^4/T$, 1/К. Прямая линия – расчет по уравнению (6); график кривой – расчет по уравнению (9)

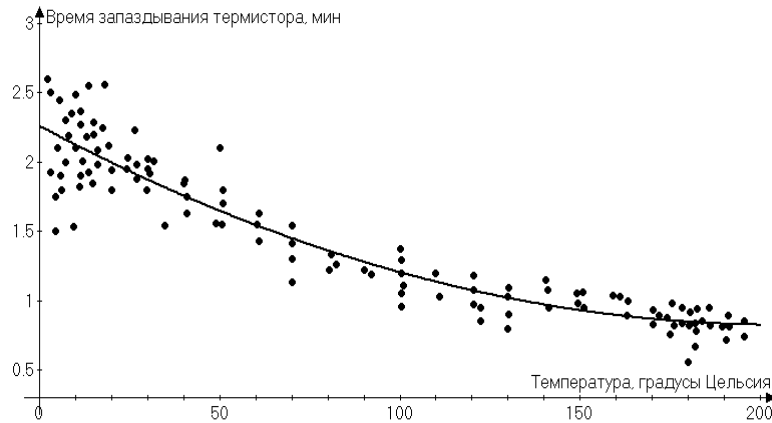


Рис. 2. Экспериментально определенные времена τ_C запаздывания термистора СТ3-19

Для определения перегрева термистора были проведены специальные опыты, в которых в стационарных состояниях при температурах от 2 до 195 °С, измерялся темп нагрева и остывания термистора (и термометра) при ступенчатом изменении выделяемой в них электрической мощности W_C . С помощью измерительной системы жидкостного калориметра, описание которой приведено в [6; 7], были проведены подробные измерения релаксационных характеристик датчиков. Расчет времени запаздывания термистора τ_C по уравнению (2) с помощью стандартной процедуры метода наименьших квадратов (МНК) [9–12] дал результаты, приведенные на рис. 2.

Аппроксимирующая кривая на рис. 2 задана полиномиальным выражением

$$\tau_C(t) = 3,3963027 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 1,39779 \cdot 10^{-2} \cdot t + 2,261388, \text{ мин}, \quad (4)$$

где t – температура в градусах Цельсия, среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек $\sigma \sim 0,18$ мин.

Теплоемкость термистора $C_C \sim (0,3 \div 0,35)$ Дж/К, коэффициент теплопередачи $K_C \sim (2 \div 5) \cdot 10^{-3}$ Вт/К, величина перегрева измерительным током не превышает $\Delta T_C \sim (10 \div 4) \cdot 10^{-3}$ К и учитывается при всех измерениях.

Разность температур между медным блоком и окружающей ее изотермической оболочкой – термостатом – не превышала $0,05 \div 0,1$ К, величина температурного хода при проведении калибровки была меньше 10^{-7} К/с, поэтому термодинамическое состояние датчиков температуры внутри медного блока в этот период являлось квазистационарным.

Обработка результатов. Функциональная зависимость электрического сопротивления оксидного полупроводникового термистора R_C от температуры T достаточно сложна, и в первом приближении ее представляют в виде сопротивления идеального полупроводника со строго одинаковым количеством дырок и носителей заряда, в экспоненциальном виде

$$R_C = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (5)$$

где R_C – электрическое сопротивление термистора, Ом, при температуре T , К; A – величина сопротивления термистора, Ом, при бесконечно большой температуре; B – параметр чувствительности термистора, в общем случае также зависящий от температуры, 1/К. При температуре $t = 1$ °С сопротивление термистора СТ3-19 $R_C \sim 30$ кОм, при температуре $t = 200$ °С $R_C \sim 50$ Ом. Величина $B \sim 4000$ 1/К, $A \sim 0,013$ Ом. После логарифмирования (5) получают

$$\frac{1}{T} = -\frac{1}{B} \cdot \ln A + \frac{1}{B} \cdot \ln R_C. \quad (6)$$

Для уточнения вопроса о перегибе, была вычислена производная $d(1/T)/d(\ln R_C)$, при этом анализировался весь массив экспериментальных точек. Значения производной $d(1/T)/d(\ln R_C)$, рассчитанные по результатам одного цикла измерений сопротивления термистора в зависимости от $\ln R_C$, приведены на рис. 3.

По результатам численного дифференцирования [13] всего массива экспериментальных точек, минимум кривой определен нами при значении $\ln R_{C \min} = 7,63 \pm 0,01$, что соответствует температуре точки перегиба (inflection point) $T_{\text{inf}} = 336,34$ К или 63,19 °С. Разлагая производную $d(1/T)/d(\ln R_C)$ в ряд в окрестности точки минимума, было получено выражение

$$\frac{d(1/T)}{d \ln R_C} = a_1 + a_2 \cdot (\ln R_C - 7,63)^2 + a_3 \cdot (\ln R_C - 7,63)^3 + \dots \quad (7)$$

где a_i – коэффициенты разложения.

После интегрирования разложение (7) приводят к следующему виду

$$\frac{1}{T} = A_0(\tau_d) + A_1(\tau_d) \cdot (\ln R_C - 7,63) + A_2(\tau_d) \cdot (\ln R_C - 7,63)^2 + A_3(\tau_d) \cdot (\ln R_C - 7,63)^3, \quad (8)$$

где $A_i(\tau_d)$ – коэффициенты разложения; τ_d – время дрейфа (drift) коэффициентов.

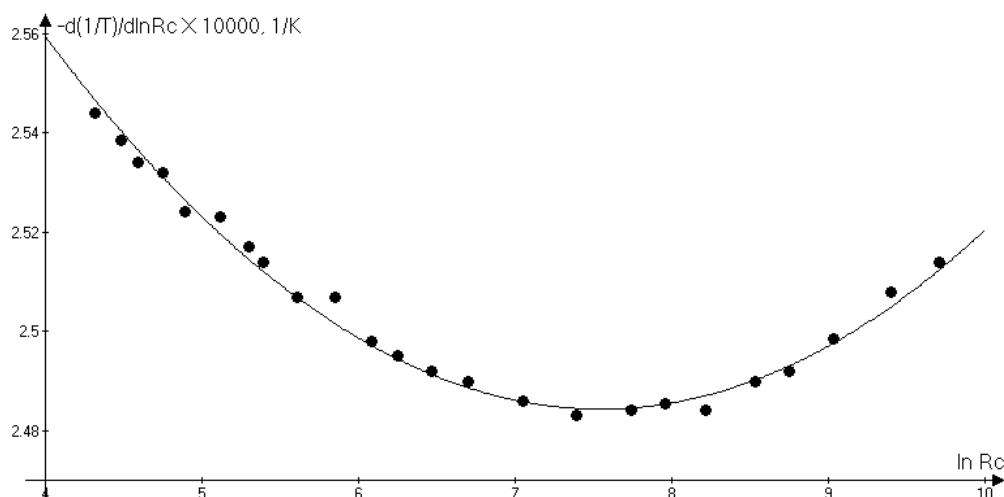


Рис. 3. Расчетная зависимость производной $-d(1/T)/d(\ln R_C) \cdot 10^4, 1/K$, в зависимости от логарифма сопротивления $\ln R_C$ термистора СТ3-19

Таким образом, калибровка термистора СТ3-19 по существу, состоит в определении численного значения коэффициентов полинома (8) $A_i(\tau_d)$ и учета их дрейфа во времени.

Основная особенность расчета по уравнению (8) заключается в привязке температуры к точке перегиба T_{inf} функциональной зависимости логарифма сопротивления термистора.

Расчет коэффициентов $A_i(\tau_d)$ был проведен с помощью стандартной процедуры метода наименьших квадратов (МНК) [9–12]. Абсолютные погрешности расчета коэффициентов $A_i(\tau_d)$ следующие: $\delta A_0 \sim 1 \cdot 10^{-3}$, $\delta A_1 \sim 1 \cdot 10^{-3}$, $\delta A_2 \sim 1 \cdot 10^{-4}$, $\delta A_3 \sim 1 \cdot 10^{-5}$.

Для контроля качества калибровок и их долговременной стабильности после каждого из 21 определения набора коэффициентов $A_i(\tau_d)$ из выражения (8) были вычислены производные $d(1/T)/d(\ln R_C)$. С разбросом не более $\Sigma \sim 5 \cdot 10^{-7}$ все значения производных лежат на кривой рис. 3. В области пониженных температур при значениях логарифмов $\ln R_C \sim 9 \div 10$, разброс калибровок несколько больше и достигает $\Sigma \sim (5 \div 7) \cdot 10^{-7}$. Связано это с тем, что там, где больше сопротивление термистора R_C и круче его температурная зависимость dR_C/dT , там меньшая плотность экспериментальных точек, поскольку калибровки термистора преимущественно проводились равномерно по температуре с шагом 10°C .

Динамика изменения коэффициентов $A_i(\tau_d)$, временной дрейф калибровки термистора представлена на рис. 4. Первые восемь циклов измерений проводились с нагревом термистора до температуры 200°C . Следствием такого нагрева был значительный дрейф калибровки и изменение коэффициентов $A_i(\tau_d)$, например $dA_0/d\tau \sim 6 \cdot 10^{-4}$ 1/мес.

После того как верхний предел температуры был снижен до 190°C , временной дрейф коэффициентов заметно уменьшился, к примеру скорость изменения коэффициента $A_0(\tau_d)$ стала всего $dA_0/d\tau \sim 1,5 \cdot 10^{-4}$ 1/мес. Значения временного дрейфа коэффициентов $A_i(\tau_d)$ приведены ниже, τ_d – месяцы.

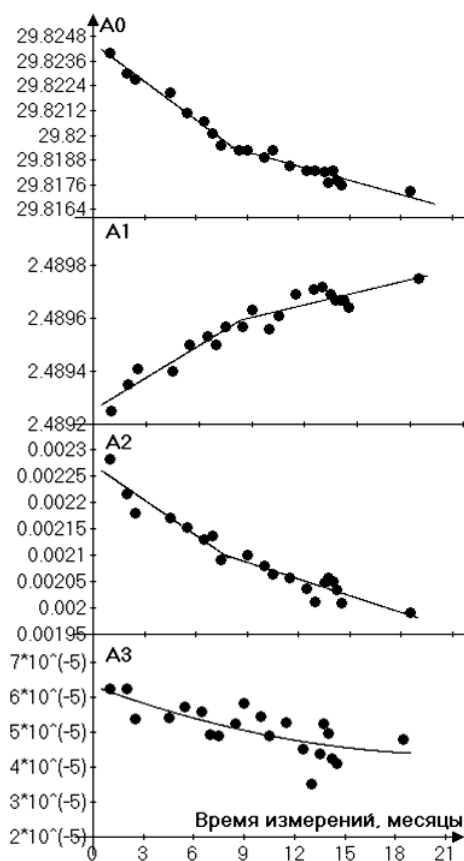


Рис. 4. Динамика изменений коэффициентов A_i во времени при нагревах до 200°C – левые части графиков, до 190°C – правые части графиков

Коэффициент $A_0(\tau_d)$:

$A_0 = -6,21997 \cdot 10^{-4} \cdot \tau_d + 29,824488$ при нагреве до 200°C ;

$A_0 = -2,3075444 \cdot 10^{-4} \cdot \tau_d + 29,819432$ при нагреве до 190°C .

Коэффициент $A_1(\tau_d)$:

$A_1 = 4,051207 \cdot 10^{-5} \cdot \tau_d + 2,489278$ при нагреве до 200°C ;

$A_1 = 1,5876991 \cdot 10^{-5} \cdot \tau_d + 2,48958$ при нагреве до 190 °С.

Коэффициент $A_2(\tau_d)$:

$A_2 = -2,2266277 \cdot 10^{-5} \cdot \tau_d + 0,0022733$ при нагреве до 200 °С;

$A_2 = -1,0559017 \cdot 10^{-5} \cdot \tau_d + 0,0021054$ при нагреве до 190 °С.

Коэффициент $A_3(\tau_d)$:

$A_3 = -3,98635 \cdot 10^{-8} \cdot (\tau_d)^2 + 1,771915 \cdot 10^{-6} \cdot \tau_d + 6,3241 \cdot 10^{-5}$ при нагреве до 190 °С и до 200 °С.

Подстановка коэффициентов $A_i(\tau_d)$, вычисленных при нагреве термистора до 190 °С в уравнение (8), снижает разброс производных $d(1/T)/d(\ln R_C)$ на кривой рис. 3 до величины $\Sigma \sim (2 \div 3) \cdot 10^{-7}$, и позволяет более точно определить точку минимума $\ln R_{C\min} = 7,632 \pm 0,01$, тем самым уменьшить погрешность расчета температуры при проведении измерений термистором СТЗ-19.

Таким образом, рекомендуемое уравнение для расчета температуры термистором СТЗ-19, учитывающее как точку перегиба (inflection point)

$T_{\text{inf}} = 336,34$ К функциональной зависимости логарифма $\ln R_C$ сопротивления термистора, так и временной дрейф полиномиальных коэффициентов разложения $A_i(\tau_d)$ при периодических нагревах термистора до 190 °С, выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{T} = A_0(\tau_d) + A_1(\tau_d) \cdot (\ln R_C - 7,632) +$$

$$A_2(\tau_d) \cdot (\ln R_C - 7,632)^3 + A_3(\tau_d) \cdot (\ln R_C - 7,632)^4. \quad (9)$$

Обсуждение результатов. Известно полиномиальное уравнение третьей степени J. S. Steinhart, S. R. Hart [14], предназначенное для расчета температуры термистором и содержащее линейный и кубический по логарифму сопротивления $\ln R_C$ члены

$$\frac{1}{T_{SH}} = A + B \cdot \ln R_C + C \cdot \ln R_C^3. \quad (10)$$

Диапазон применения по температуре данного уравнения с одним набором коэффициентов не превышает 50 ÷ 75 К [14; 15]. Используя опубликованные в современных интернет-изданиях [15] наборы численных значений коэффициентов уравнения Steinhart'a и Hart'a, было проведено сопоставление результатов расчета температуры по уравнению Steinhart'a и Hart'a и по нашему уравнению четвертой степени логарифмов сопротивления термистора (9).

Относительные разности температур

$$\delta = (T_{SH} - T) / T \cdot 100 \%,$$

в зависимости от $\ln R_C$ представлены на рис. 5. Проведенное сопоставление результатов показывает, что разности температур δ в зависимости от $\ln R_C$ имеют знакопеременный характер.

Минимальные значения разностей температур δ порядка 0,25 %, наблюдаются при величине $\ln R_C \sim 6$ термистора СТЗ-19. Максимальные значения разностей δ , достигающие 0,8 ÷ 1 %, имеют место на краях интервала применимости уравнения (9).

Погрешность определения температуры (разностей температур) термистором СТЗ-19 с помощью уравнения четвертой степени (9) с учетом точки перегиба при $\ln R_C = 7,632$, не превышает $(3 \div 5) \cdot 10^{-4}$ К.

Применение полиномиального уравнения четвертой степени (9) с привязкой температуры к точке перегиба функциональной зависимости логарифма сопротивления термистора, позволяет расширить диапазон и повысить точность определения температуры.

Учет временного дрейфа коэффициентов разложения полинома (9) $A_i(\tau_d)$ позволяет повысить точность определения точки минимума $\ln R_{C\min} = 7,632 \pm 0,01$ характеристик термистора и тем самым точность определения температуры.

Применение полиномиального уравнения третьей степени Steinhart'a и Hart'a увеличивает погрешности расчета температуры термистором на краях интервала 273 К ÷ 473 К до 1,5 ÷ 2 К.

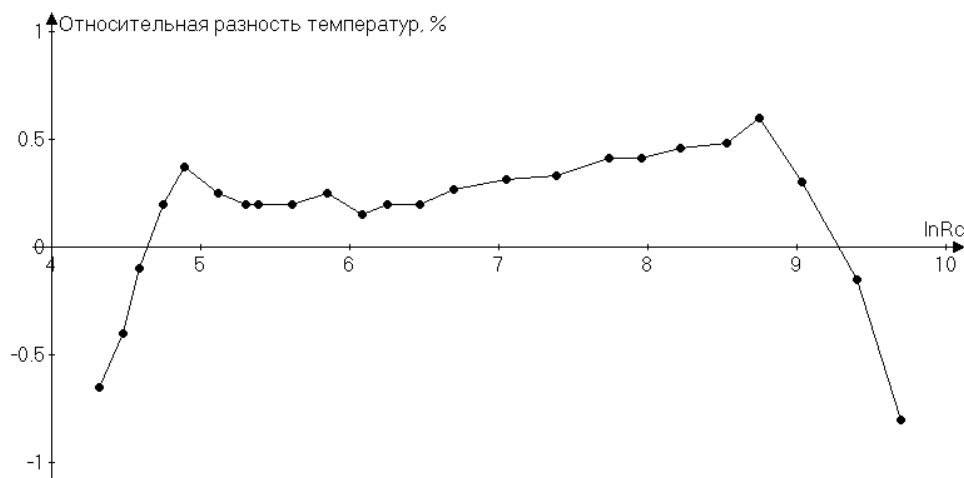


Рис. 5. Относительные разности температур δ , вычисленные по уравнению Steinhart'a и Hart'a, и по уравнению четвертой степени относительно точки перегиба характеристик термистора (9)

Библиографические ссылки

1. *Линевер Ф.* Измерение температур в технике. Справочник. М. : Металлургия, 1980.
2. *Кондратьев Г. М.* Тепловые измерения. М. : Машгиз, 1957.
3. *Мэклин Э. Д.* Терморезисторы. М. : Радио и связь, 1983.
4. *Гендин Г. С.* Все о резисторах : справочное издание. М. : Горячая Линия-Телеком, 2000.
5. *Шефтель И. Т.* Терморезисторы. М. : Наука, 1973.
6. *Серяков А. В.* Автоматизированный калориметр постоянного объема для исследования растворов электролитов // Теплофизические свойства растворов, расплавов и композитов : сб. научн. тр. ; Институт теплофизики СО РАН. Новосибирск, 1991. С. 139–153.
7. *Груздев В. А., Серяков А. В.* Жидкостный калориметр // Теплофизические свойства веществ : тр. 8-й Всесоюз. конф. Новосибирск, 1989. Ч. 1. С. 256–261.
8. *Камке Э.* Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М. : Наука, 1976.
9. *Демидович Б. П., Марон И. А.* Основы вычислительной математики. М. : Наука, 1966.
10. *Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченкова Н. В.* Вычислительные методы для инженеров. М. : Высшая школа, 1994.
11. *Хемминг Р. В.* Численные методы. М. : Наука, 1968.
12. *Дэвенпорт Дж., Сирэ И., Турнье Э.* Компьютерная алгебра: Системы и алгоритмы алгебраических вычислений. М. : Мир, 1991.
13. *Мудров А. Е.* Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск : Раско, 1991.
14. *Steinhart J. S., Hart S. R.* Calibration curves for thermistors // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 1968. Vol. 15. № 4. P. 497–503.
15. Cornerstone Sensors. A, B, C Coefficients for Steinhart-Hart Equation. Temperature Sensors for Health, Science and Industry. 2010. 2 p. California 92083. USA.

© А. В. Серяков, 2013

УДК 628.16.087

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОАГУЛЯЦИИ НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ

И. Я. Шестаков¹, О. В. Раева²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: yakovlevish@mail.ru

²Сибирский федеральный университет, институт цветных металлов и материаловедения 660025, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 95. E-mail: O.V.Raeva@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований очистки воды, заключающейся в пропускании через нее переменного асимметричного тока с использованием нерастворимых разнородных электродов, введении коагулянта и отстаивании.

Ключевые слова: вода, электрохимический способ, переменный ток, коагулянт, отстаивание.

ASSESSMENT OF COAGULATION INFLUENCE ON INDEX OF PURIFICATION OF WATER FROM METAL IONS

I. Ya. Shestakov¹, O. V. Raeva²

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev 31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: yakovlevish@mail.ru

²Siberian Federal University, Institute of Non-Ferrous Metals and Material Science 95 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660025, Russia. E-mail: O.V.Raeva@mail.ru

The article presents the results of experimental studies of water purification, consisting of passing through it asymmetric alternating current with application of insoluble heterogeneous electrodes, introducing coagulating agent and settling.

Keywords: water, electrochemical method, alternating current, coagulating agent, settling.

Загрязнение воды является одной из острых экологических проблем в мире. Более 90 % сточных вод сбрасываются в открытые водоемы без предварительной очистки. Загрязнены реки, озера, подземные

источники. В большой мере причиной тому являются сточные воды гальванических производств, содержащие целый ряд ионов металлов, пагубно воздействующих на здоровье людей и окружающую среду.

Попытки создания установок для нейтрализации сточных вод гальванических производств не дают положительных результатов, потому что на нейтрализацию направляют смешанные стоки, содержащие целый «букет» особо опасных тяжелых металлов. Из-за повышенного загрязнения природных водоисточников традиционно применяемые технологии обработки воды стали недостаточно эффективными [1–3].

К одному из наиболее перспективных направлений очистки воды следует отнести электрохимические методы, и в частности, электрохимические методы очистки воды на переменном токе промышленной частоты.

Однако большое потребление электроэнергии и использование растворимых электродов ограничивают применение электрохимических процессов на практике.

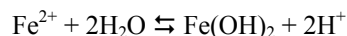
В Сибирском государственном аэрокосмическом университете разработан способ очистки воды от анионов и катионов электрохимическим методом с применением нерастворимых электродов и переменного асимметричного тока [4–9].

Для реализации предлагаемого способа процесс очистки проводят в электролизере из чередующихся электродов, выполненных в виде пластин. Материал электродов: нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, титановый сплав ОТ 4-0. Расстояние между электродами 12 мм. Объем заливаемой воды 1 л. Электроды подключались параллельно к источнику переменного тока частотой 50 Гц; боковые стенки при использовании электролизера являлись рабочими. Температура очищаемой воды 20–25 °С. Переменный электрический ток пропусклся через воду в течение 10 мин при силе тока 0,5 А и напряжении на клеммах электродов 4,1 В.

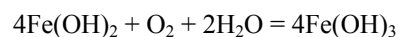
Обработке подвергалась вода, содержащая ионы кадмия (II), меди (II), никеля (II) и хрома (VI). Начальная концентрация каждого иона в воде 0,5 мг/л.

После пропускания переменного электрического тока в воду вводился коагулянт – сульфат закиси железа $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (железный купорос), далее вода отстаивалась. Экспериментальные данные подтверждают, что сульфат закиси железа по сравнению с другими коагулянтами (например, железо (III) хлористое $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, железо (III) сернокислородное $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) обладает хорошей растворимостью в воде, поэтому нашло широкое практическое применение в очистке воды.

При добавлении железного купороса в воду происходит его гидролиз, с образованием хорошо растворимого в воде гидроксида железа (II):



Образующийся гидроксид железа (II) под действием кислорода, растворенного в воде, окисляется до гидроксида железа (III), выпадающего в осадок в виде хлопьев:



Именно образующийся гидроксид железа (III) и является истинным коагулянт (комплексобразователем).

Соотношение начальных концентраций иона комплексобразователя и удаляемого иона ($C_{\text{оFe}^{2+}} / C_{\text{оi}}$) изменялось от 1:1 до 2,5:1. Время отстаивания воды ($\tau_{\text{отс}}$) изменялось от 1 до 10 суток.

Количественный анализ ионов, содержащихся в воде после очистки, проводился на масс-спектрометре Agilent 7500 ICP-MS.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Степень очистки определялась по формуле, %

$$Y = \left(\frac{C_0 - C_k}{C_0} \right) 100,$$

где C_0 , C_k – начальная и конечная концентрации удаляемого иона металла, мг/л.

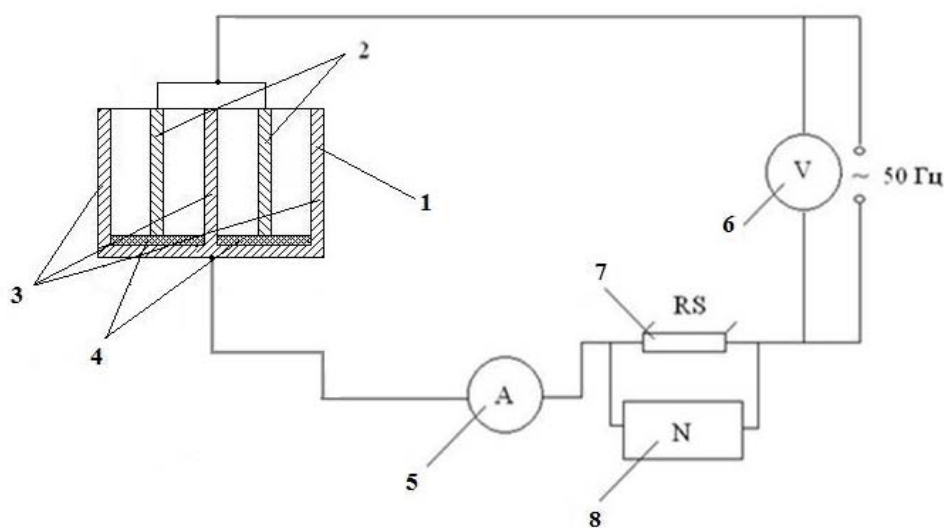


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:
1 – корпус; 2 – титановые электроды ОТ4-0; 3 – стальные электроды 12Х18Н10Т;
4 – пластины диэлектрические (оргстекло); 5 – амперметр; 6 – вольтметр;
7 – шунт измерительный; 8 – осциллограф С1-83

Удельные энергозатраты W определялись по формуле, (кВт·ч)/м³:

$$W = \frac{IU\tau}{V} 10^{-3},$$

где I – сила тока, А; U – напряжение на клеммах электродов, В; τ – время пропускания электрического тока, ч; V – объем заливаемой воды, м³; 10^{-3} – переводной коэффициент из Вт в кВт.

Исследование влияния соотношения начальных концентраций иона комплекссообразователя и удаляемого иона на степень очистки воды проводилось при постоянном времени отстаивания (10 сут).

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 2.

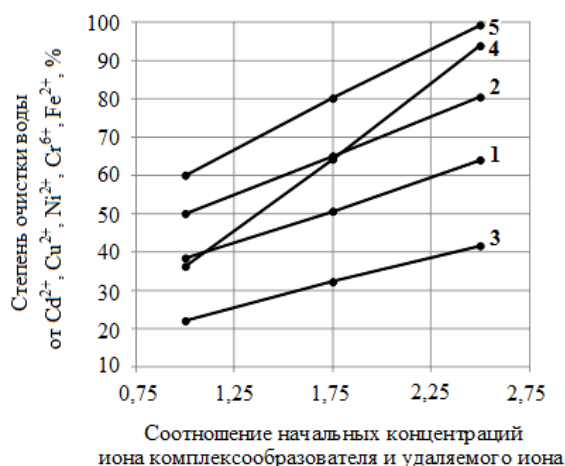


Рис. 2. Зависимость степени очистки воды от соотношения начальных концентраций иона комплекссообразователя и удаляемого иона:
1 – кадмия; 2 – меди; 3 – никеля; 4 – хрома; 5 – железа

Исследование влияния времени отстаивания воды на степень очистки проводилось при постоянном соотношении начальных концентраций иона комплексобразователя и удаляемого иона (2,5:1). Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.

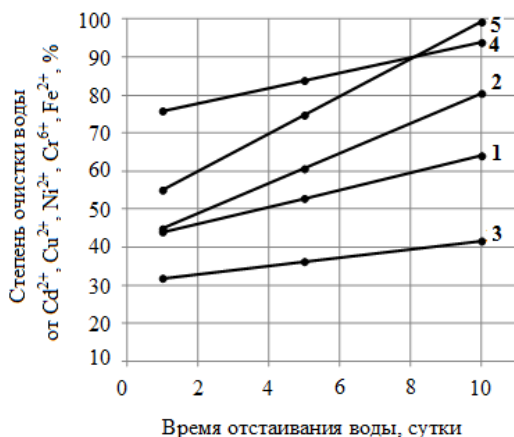


Рис. 3. Зависимость степени очистки воды от времени отстаивания воды. Удаляемые ионы:
1 – кадмий; 2 – медь; 3 – никель; 4 – хром; 5 – железо

Из графиков видно, что увеличение соотношения начальных концентраций иона комплексобразователя и удаляемого иона и времени отстаивания приводит к значительному увеличению степени очистки воды от рассматриваемых ионов при малых удельных энергозатратах (0,34 кВт·ч/м³).

При увеличении соотношения начальных концентраций от 1:1 до 2,5:1 степень очистки увеличивается для кадмия в 1,7 раза, меди – 1,6, никеля – 1,9, хрома – 2,6 и железа – 1,7.

При увеличении времени отстаивания воды от 1 до 10 суток степень очистки увеличивается для кадмия в 1,5 раза, меди – 1,8, никеля – 1,3, хрома – 1,2 и железа – 1,8.

Экспериментальные исследования показали, что наибольшая степень очистки воды от всех рассматриваемых ионов металлов достигается при пропускании через очищаемую воду переменного асимметричного тока с использованием нерастворимых электродов (нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, титановый сплав ОТ 4-0), введением коагулянта – сульфата закиси железа $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в соотношении начальных концентраций иона комплексобразователя и удаляемого иона 2,5:1 и отстаиванием воды в течение 10 суток. При этом степень очистки воды равна: от кадмия 64 %, меди – 80,4 %, никеля – 41,6 %, хрома – 93,8 % и железа – 99,2 %. Удельные энергозатраты составляют $W = 0,34$ (кВт·ч)/м³.

Библиографические ссылки

1. Ключков Б. Я. Экологические проблемы гальванотехники // Машиностроитель. 1997. № 6. С. 33–35.
2. Водное хозяйство промышленных предприятий : справочное издание. В 2-х кн. Кн. 1 / Аксенов В. И. [и др.]; под ред. В. И. Аксенова. М. : Теплотехник, 2005.
3. Яковлев С. В., Воронов Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод. М. : АСВ, 2004.
4. Стрюк А. И., Шестаков И. Я., Фадеев А. А., Фейлер О. В., Суряков А. А., Кушир А. А. Способ очистки воды и водных растворов от анионов и катионов. Патент РФ № 2213701, С 02 F 1/46//С 02 F 103:16. Оpubл. Б. И. № 28, 10.10.2003.
5. Стрюк А. И., Шестаков И. Я., Фадеев А. А., Фейлер О. В., Суряков А. А., Кушир А. А. Установка очистки воды и водных растворов от анионов и катионов. С. № 18532, С 02 F 1/46. Оpubл. Б. И. № 18. 27.06.2001.
6. Шестаков И. Я., Вдовенко В. Г. Способ электрохимической очистки воды и водных растворов от ионов тяжелых металлов. А. с. №1724591. С 02 F 1/46. Оpubл. Б. И. № 13 07.04.1992.
7. Шестаков И. Я., Герасимова Л. А. Исследование электрохимических способов очистки воды и водных растворов от ионов тяжелых металлов // Сб. САА. 1996. С. 32–35.
8. Шестаков И. Я., Раева О. В., Фейлер О. В. О механизме электрохимической очистки сточных вод переменным током // Вестник СибГАУ. 2011. № 1/34. С. 147–150.
9. Шестаков И. Я., Раева О. В. Электрохимический метод очистки сточных вод переменным током // Техника и технологии. СФУ. 2011. № 4/3. С. 348–355.

© Шестаков И. Я., Раева О. В., 2013

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВИБРИРУЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ-ИНСТРУМЕНТОМ

И. Я. Шестаков¹, И. А. Ремизов², О. Е. Артюкова¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
660014, Россия, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: yakovlevish@mail.ru

²Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого
660022, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, д. 1

Представлено определение скоростей сведения и разведения электродов при контакте последних в каждом периоде колебаний. Рассмотрены физические эффекты, происходящие в изменяющемся межэлектродном зазоре. Показано, что поверхность обрабатываемой детали, расположенная напротив торца электрода-инструмента формируется электроэрозионным воздействием и анодным растворением. Боковая поверхность полости получается за счёт анодного растворения. Представлены выражения для расчёта параметра шероховатости поверхности. Удельные энергозатраты при комбинированной обработке практически совпадают с затратами при электроконтактной обработке. Это является несомненным преимуществом рассматриваемого метода. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: обработка, электрод-инструмент, вибрация, эффекты, шероховатость, поверхность, точность.

FEATURES OF ELECTRO-DISCHARGE-CHEMICAL MACHINING WITH VIBRATING ELECTRODE-TOOL

I. Ya. Shestakov¹, I. A. Remizov², O. E. Artyukova¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: yakovlevish@mail.ru

²Krasnoyarsk State Medical University named after professor V. F. Voyno-Yasnetskiy
1 Partizan Zheleznyaka street, Krasnoyarsk, 660022, Russia

In the paper the authors present estimation of speed of connection and disconnection of electrodes in the process of their contact in each oscillation period. Physical effects occurring in the changing electrode gap are considered. Expressions for calculation of the parameters of surface roughness are presented. The results of the experiments are offered.

Keywords: processing, electrode-tool, vibration, effects, roughness, surface.

При электрохимической и электроэрозионной обработках межэлектродный зазор (МЭЗ) является определяющим параметром процесса: чем меньше его величина, тем выше скорость съема металла, меньше погрешность копирования, лучше показатели качества поверхности. Однако с уменьшением МЭЗ усложняется процесс его регулирования, возрастают затраты на прокачку рабочей жидкости, усложняется проектирование электрода-инструмента.

Для устранения этого противоречия применяют импульсно-циклические способы обработки (электрохимическая размерная обработка и специальные рабочие жидкости (электроэрозионная обработка), что приводит к удорожанию оборудования и расходных материалов.

Комбинированный метод обработки [1] электроконтактный и электрохимический осуществляемый вибрирующим катодом-инструментом позволяет использовать простой линейный электродинамический привод [2], а в качестве рабочей жидкости применять воду или водный раствор азотнокислого натрия малой

концентрации (1–5 г/л). Схема электроконтактнo-химической обработки приведена на рис. 1.

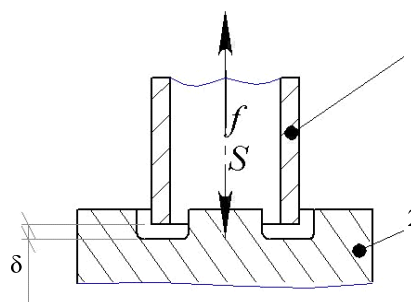


Рис. 1. Схема электроконтактнo-химической обработки:
1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая деталь;
δ – межэлектродный зазор

Электроду-инструменту (1) сообщается движение к обрабатываемой поверхности детали (2), при этом зазор δ уменьшается до нуля, затем электрод-инструмент отводится от обрабатываемой детали на

зазор, определяемый параметрами привода. Если электрод-инструмент является катодом, то на его поверхности выделяется водород и образующийся газовый фронт движется со скоростью v_{Γ} (рис. 2).

При сближении электродов эта скорость определяется:

$$v_{\Gamma}^c = v_c + \frac{W}{F}, \quad (1)$$

где W – объемная скорость выделения водорода; F – площадь проекции катода-инструмента на обрабатываемую поверхность.

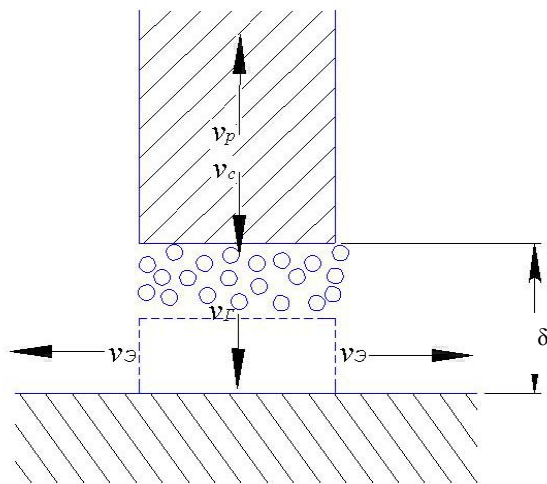


Рис. 2. Расчетная схема скорости разведения и сведения электродов:

v_p – скорость разведения катода-инструмента; v_c – скорость сведения катода-инструмента; v_{Γ} – скорость движения границы газового слоя; $v_э$ – скорость движения рабочей жидкости относительно обрабатываемой поверхности

При разведении электродов скорость движения границы газового слоя рассчитывается

$$v_{\Gamma}^p = v_p - \frac{W}{F}. \quad (2)$$

Для цилиндрического катода-инструмента, внутренний радиус которого – r , внешний – R , скорость движения электролита за счет вытеснения газовым слоем равна

$$v_э = \frac{v_{\Gamma}(R-r)}{2\delta}. \quad (3)$$

Для обеспечения неподвижности рабочей жидкости у обрабатываемой поверхности необходимо равенство скоростей (2):

$$v_p = \frac{W}{F}. \quad (4)$$

После подстановки значения W и F получим

$$v_p = i \cdot k_{\text{H}_2} \cdot k_{\Gamma} \cdot \eta \cdot \frac{P_{\text{н.у.}}}{p}, \quad (5)$$

где i – плотность тока на катоде-инструменте; k_{H_2} – объемный электрохимический эквивалент выделения водорода; k_{Γ} – термический коэффициент увеличения

объема водорода; η – выход водорода по току; $P_{\text{н.у.}}$ – давление при нормальных условиях; p – давление податчи рабочей жидкости в МЭЗ.

Согласно выражению (3) скорость движения рабочей жидкости (электролита) относительно обрабатываемой поверхности стремится к бесконечности при уменьшении МЭЗ к нулю. Однако скорость движения электролита не может превышать скорости звука в рабочей жидкости. Подставив (1) в (2) с учетом вышесказанного, получим:

$$v_c \leq \frac{\alpha 2\delta}{R-r} - i k_{\text{H}_2} k_{\Gamma} \cdot \eta \cdot \frac{P_{\text{н.у.}}}{p}, \quad (6)$$

где α – скорость звука в прианодном слое электролита.

Второе слагаемое в правой части выражения (6) намного меньше первого слагаемого. Таким образом, характер изменения скорости сближения электродов практически полностью определяется законом изменения межэлектродного зазора. При движении катода-инструмента к обрабатываемой поверхности напряженность электрического поля растет, что вызывает нагрев двойного электрического слоя (ДЭС) как на катоде, так и на аноде. В адиабатном приближении прирост температуры может быть определен:

$$\Delta T = \frac{\chi \cdot E_D \cdot E \cdot \tau}{\rho \cdot c}, \quad (7)$$

где χ – электропроводность жидкости в МЭЗ; E_D – напряженность электрического поля в ДЭС; E – напряженность электрического поля в МЭЗ; τ – время сближения электродов; ρ – плотность жидкости в МЭЗ; c – теплоемкость жидкости в МЭЗ. По данным В. Г. Левича, напряженность поля в ДЭС равна 10^6 – 10^7 В/см.

На границе электролит–металл происходит поверхностное тепловыделение за счет эффекта Пельтье:

$$q = i(\eta + \pi), \quad (8)$$

где η – перенапряжение электродных процессов; π – коэффициент Пельтье. При электрохимической обработке $\eta = (1 - 3)$ В, что во много раз больше π , поэтому выражение (8) можно записать как

$$q = i \cdot \eta. \quad (9)$$

Повышение температуры приэлектродной области приведет к росту термоэлектронной эмиссии на поверхности катода и пробоем межэлектродного зазора. Начинается процесс электроэрозионного разрушения обрабатываемого материала. Далее следует механический контакт катода-инструмента с поверхностью обрабатываемой детали, ток при этом многократно возрастает, что приводит к асимметрии импульсного проплавления материала электродов (электроконтактная обработка). Явление асимметрии проплавления объясняется возникновением мощного термоэлектрического эффекта Томпсона, заключающегося в конвективном переносе теплоты в зоне тепловых полей высокотемпературным градиентом.

При разведении электродов ток уменьшается до величины определяемых переносом ионов в электро-

лите, начинается процесс анодного растворения поверхности обрабатываемой детали. Таким образом, поверхность детали, расположенная напротив торца катода-инструмента, подвергается электроэрозионной и электрохимической обработкам. Боковые поверхности полости детали формируются электрохимической обработкой.

При малых амплитудах колебаний при разведении электродов будет образовываться металлический мостик, который способствует появлению дугового разряда и в межэлектродном зазоре реализуется размерная обработка дугой (РОД). Для этого вида обработки характерны высокая производительность и низкое качество обработанной поверхности.

Шероховатость поверхности, формируемой торцом катода-инструмента можно оценить по выражению

$$R_z = k(A_{эл} + A_{мех})^p, \quad (10)$$

где k – коэффициент, зависящий от режима обработки, материала обрабатываемой детали; $A_{эл}$ – электрическая составляющая эрозионного разрушения металла; $A_{мех}$ – механическая составляющая эрозионного разрушения металла; p – показатель степени, характеризующий форму лунки, $p = 0,3...0,004$. В общем случае $k = 2...50$.

Электрическая составляющая эрозионного разрушения металла определяется по формуле

$$A_{эл} = U_{ср} \cdot I_{ср} \cdot \tau_{эр}, \quad (11)$$

где $U_{ср}$ – среднее напряжение во время обработки; $I_{ср}$ – среднее значение силы тока во время обработки; $\tau_{эр}$ – время эрозионного разрушения за один период колебаний катода-инструмента.

Механическая составляющая эрозионного разрушения определяется следующим образом:

$$A_{мех} = m \cdot f^2 \cdot A^2, \quad (12)$$

где m – масса катода-инструмента; f – частота колебаний катода-инструмента; A – амплитуда колебаний катода-инструмента.

Шероховатость поверхности, формируемой боковой поверхностью катода-инструмента за счет анодного растворения оценивается выражением:

$$R_a = k U_{ср}^{-0,5} \cdot \frac{\tau_{уст}}{\tau_{ан}} \cdot c^{-0,5}, \quad (13)$$

где k – постоянный множитель, равный 0,1 В·мкм; $U_{ср}$ – среднее напряжение на электродах во время обработки; $\tau_{уст}$ – время установления стабильного значения шероховатости, в большинстве случаев $\tau_{уст} = 8...10$ с; $\tau_{ан}$ – время анодного растворения за один период колебания катода-инструмента; c – концентрация соли, выраженная в долях единицы.

Из приведенных выражений следует, что время электроэрозионного воздействия на обрабатываемую поверхность определяется частотой колебаний като-

да-инструмента, а мощность разрушения пропорциональна квадрату частоты и амплитуды вибрирующего инструмента.

При сообщении катоду колебаний возможно ожидать уменьшения затрат энергии на газообразование водорода. Водород выделяется в виде пузырьков, размеры которых изменяются. При наличии колебаний пузырьки водорода будут деформироваться, что приведет к изменению радиуса кривизны, что в конечном итоге уменьшит величину перенапряжения электродной реакции. Это предположение подтверждено снятием поляризационных кривых.

Известно, что основную роль в анодном растворении выполняют силы гидратации, которые под воздействием приложенного к аноду напряжения вырывают ионы металла и гидратируют их. При сближении электродов электрическое поле вызывает дополнительную ориентацию диполей воды и увеличивает их адсорбцию в прианодном слое. При разведении электродов будет иметь место тенденция к разрыву приэлектродного слоя, что вызовет большее гидратационное воздействие. В конечном итоге рассмотренные явления приведут к снижению удельных энергозатрат.

На поверхности катода-инструмента и детали имеются впадины и выступы, что при сближении электродов приведет к появлению суживающихся и расходящихся капилляров. Суживающиеся капилляры будут заполняться рабочей жидкостью (электролитом) с большой скоростью. Расчет по известным зависимостям показал, что скорость заполнения составляет более 10,0 м/с. Наличие электролита в суживающихся каналах способствует анодному растворению выступов на обрабатываемой поверхности.

На лабораторной установке [3] при использовании катода-инструмента в виде цилиндрической трубки, был получен кольцеобразный паз при точности копирования формы 20 мкм, шероховатости боковых поверхностей Ra 0,4 мкм, торцевых поверхностей Ra 1,8 мкм. Значения шероховатости поверхности практически совпадают с расчетными величинами, что говорит в пользу предложенной модели.

Библиографические ссылки

1. Способ электроконтактной химической обработки: патент РФ № 2428287 / И. Я. Шестаков ; Оpubл. 10.09.2011. Бюл. № 25.
2. Шестаков И. Я., Фадеев А. А. Линейные электродинамические двигатели: конструирование, практическое использование : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011.
3. Шестаков И. Я., Стрюк А. И. Установка электрообработки с линейным электродинамическим двигателем // Вестник СибГАУ. 2006. № 3 (10). С. 65–67.

© Шестаков И. Я., Ремизов И. А.,
Артюкова О. Е., 2013

УДК 621.923.6

ПОТЕРЯ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. С. Янюшкин, Д. В. Лобанов, П. В. Архипов

Братский государственный университет

Россия, 665709, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко, 40. E-mail: yanyushkin@brstu.ru

Отражены причины потери режущей способности алмазных шлифовальных кругов на металлической связке в различных условиях шлифования композиционных материалов. Уделено внимание выявлению недостатков традиционных методов алмазного шлифования, которые в большинстве случаев, не позволяют достигать качества обработки композиционных материалов. Исследования проведены с использованием методов растровой, оптической микроскопии и интерферометрии. Затронутые проблемы и способы их решения направлены на совершенствование технологий машиностроительных предприятий, с целью повышения рентабельности и производительности обработки, а также обеспечения высокого качества изделий из композиционных материалов.

Ключевые слова: шлифование, алмазный круг, засаливание, композиционные материалы.

LOSS OF CUTTING ABILITY OF METAL BOUND DIAMOND WHEELS AT GRIND OF COMPOSITE MATERIALS

A. S. Yanyushkin, D. V. Lobanov, P. V. Arhipov

Bratsk State University

40 Makarenko street, Bratsk, 665709, Irkutsk Region, Russia. E-mail: yanyushkin@brstu.ru

The article dwells upon the reasons of loss of cutting ability of metal bound diamond wheels in different conditions of grind of composite materials. The attention is paid to detection of deficiencies of traditional methods of diamond grind, which in most cases do not allow to reach the required quality of composite materials processing. The researches were performed with the use of methods of raster, optical microscopy and interferometry. The problems under discussion and methods of their solution are directed to technological advancement of machine-building enterprises, for the purpose of rise of profitability and capacity of processing, as well as quality assurance of items made of composite materials.

Keywords: grind, diamond grinding wheel, composite materials.

Потеря режущей способности алмазных кругов при шлифовании твердого сплава напрямую влияет на качество формообразования режущей части инструмента [1, 2].

Существует ряд гипотез потери режущей способности абразивного инструмента в процессе шлифования.

Абразивное изнашивание алмазных шлифовальных кругов, может возникать за счет того, что зерна невыгодно ориентированные на поверхности круга вырываются из связки или механически изнашиваются под действием сил резания. Абразивное изнашивание усиливается при шлифовании в химически активных средах, ослабляющих сопротивляемость контактных поверхностей обрабатываемого материала и шлифовального круга [3–7].

В процессе шлифования между шлифовальным кругом и деталью имеются условия для образования адгезионного схватывания. Адгезионное изнашивание наблюдается, когда обрабатываемый металл прилипает на вершины и изношенные площадки алмазных зерен, вследствие схватывания или химического взаимодействия с абразивными зернами. Фактическая

площадь контакта при микрорезании составляет незначительную часть от номинальной площади контакта. Вследствие высоких контактных давлений, в точках соприкосновения выступов абразивных зерен со шлифуемой поверхностью развиваются локальные пластические деформации с высокой температурой. В результате этого происходит соприкосновение химически чистых участков обрабатываемого материала с абразивными зернами и их взаимное схватывание с образованием очагов «мостиков» схватывания. При микрорезании абразивными зернами детали происходит непрерывное разрушение и возобновление «мостиков» схватывания [5–8].

Диффузионное изнашивание происходит вследствие того, что при микрорезании единичными зернами происходит развитие адгезионных процессов, тогда при контакте алмазного зерна и обрабатываемого материала не исключено и возникновение диффузионных явлений [6; 7].

Окислительное изнашивание основывается на известном факте коррозии твердых сплавов при нагреве их в среде кислорода и отсутствии изменения свойств поверхностных слоев сплавов при нагреве их в инерт-

ных газах (аргоне, азоте, гелии). Согласно этой гипотезе при температурах резания 700...800 °С кислород воздуха вступает в химическую реакцию с кобальтовой фазой твердого сплава и карбидами вольфрама, причем наиболее сильно окисляется кобальт. Вследствие значительной пористости металлокерамических твердых сплавов окислительным процессам подвергаются не только сами контактные поверхности шлифовального круга, но и зерна твердого сплава, лежащие на некоторой глубине от этих поверхностей.

Процессы, протекающие в зоне резания при шлифовании твердых сплавов, приводят к потере режущей способности алмазных шлифовальных кругов на металлической связке, к такому явлению, как засаливание [1; 4–8].

Для изучения процесса засаливания алмазных кругов проведены исследования изменения состояния поверхности алмазного круга при шлифовании твердого сплава [1, 3, 8, 9].

Проведены исследования образцов, вырезанных из алмазного шлифовального круга марки 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80, после обработки твердого сплава ВК8, шлифование без СОЖ. Образцы алмазного шлифовального круга исследовались с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA, растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 со встроенным химическим анализатором EDS X-Act, оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1m, а также оптического интерферометра Zygo New View TM 7300. В качестве эталона была принята поверхность образца, вырезанного из шлифовального круга завода изготовителя и образца после электрохимической правки.

Исследование поверхности шлифовального круга (эталона), которая сформирована на стадии изготов-

ления, показало, что поверхность имеет неразвитую структуру, большая часть алмазных зерен скрыта связкой, такая поверхность не может обладать высокими режущими свойствами (рис. 1).

Модель участка эталонной поверхности алмазного круга, исследованная с помощью оптической интерферометрии, показана на рис. 2.

Темные участки на изображении соответствуют алмазным зернам, которые выступают из связки и участвуют в процессе шлифования.

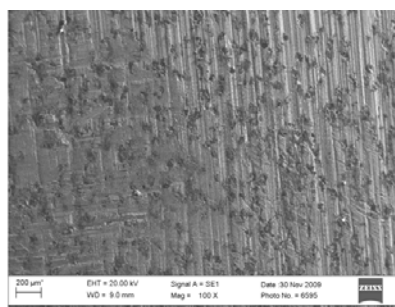
Топографическое исследование (рис. 3) показывает, что максимальная величина, на которую выступают отдельные алмазные зерна, колеблется в пределах 5 мкм, остальная часть рельефа образована неровностями связки и равна 9 мкм.

Спектральный анализ поверхности эталона алмазного круга (рис. 4) также свидетельствует о наличии фаз углерода – алмаза и элементов, входящих в состав связки (медь и олово).

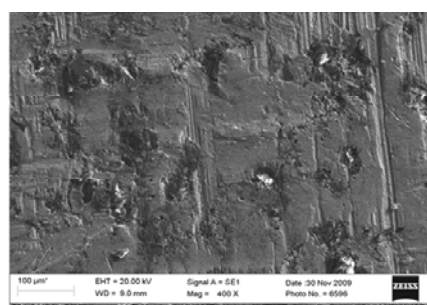
Как показывает рентгенограмма (рис. 5), фазы меди и олова проявляются в виде твердых растворов $\text{Cu}_{0,932}\text{Sn}_{0,068}$ и $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$. Другие включения и соединения обнаружены не были.

Известно, что алмазные круги на металлической связке, как правило, полностью теряют свои режущие свойства в течение первых минут работы, особенно при шлифовании без СОЖ [1–3].

Исследования образца алмазного круга после 15 мин шлифования твердого сплава ВК8, позволили определить очаги образования засаленного слоя. Такими очагами могут являться как алмазные зерна, так и связка. Во время обработки твердый сплав образует навалы на боковой поверхности алмазного зерна, которые, взаимодействуя со связкой, способствуют дальнейшему развитию засаливания (рис. 6).



× 100



× 400

Рис. 1. Поверхность эталона алмазного круга

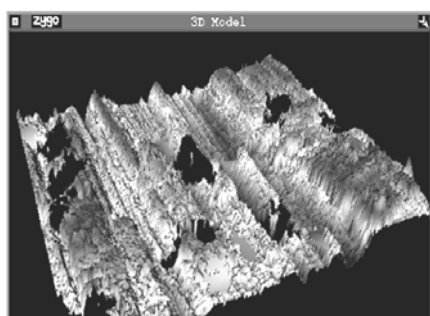


Рис. 2. Модель поверхности эталона алмазного круга

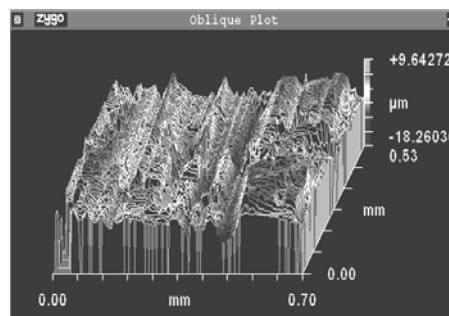


Рис. 3. Топографическое изображение участка поверхности эталона алмазного круга

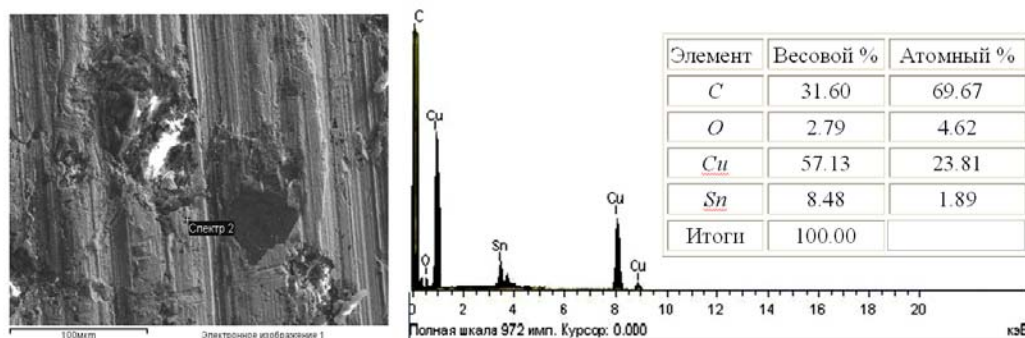


Рис. 4. Спектральный анализ участка поверхности эталона алмазного круга

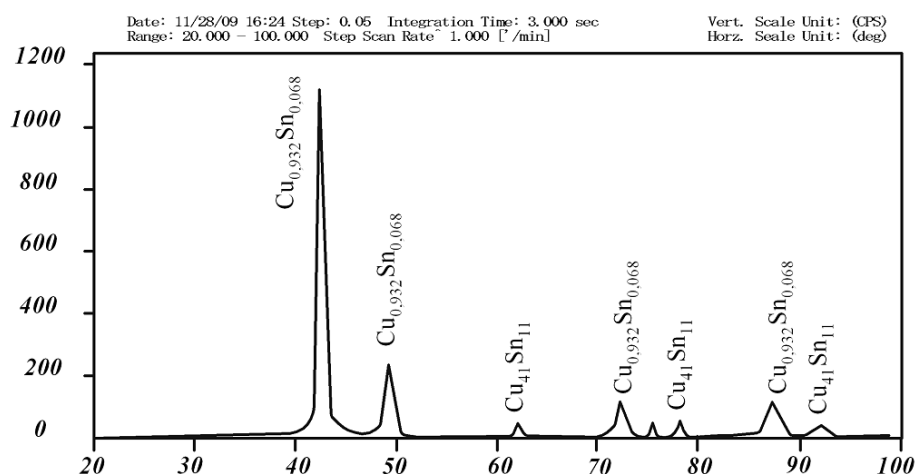


Рис. 5. Рентгенограмма эталона алмазного круга

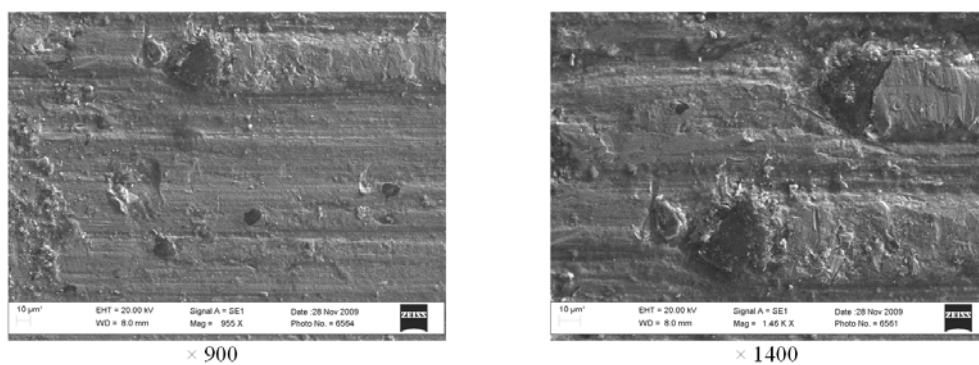


Рис. 6. Участок поверхности алмазного круга на металлической связке после 15 мин шлифования без СОЖ

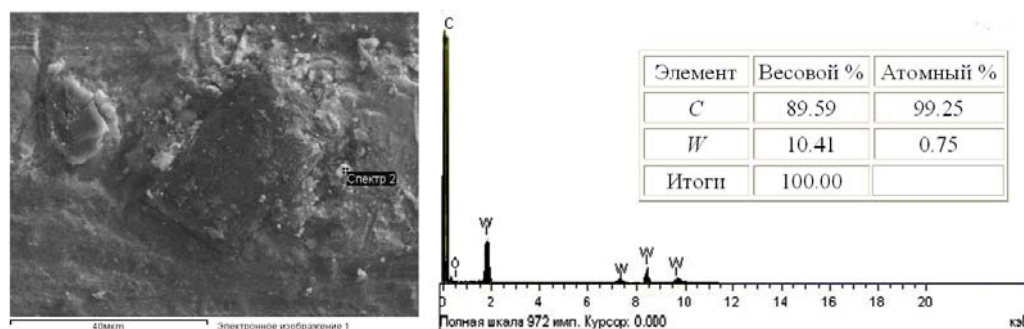


Рис. 7. Спектральный анализ участка поверхности алмазного круга после 15 мин шлифования без СОЖ

Спектральный анализ поверхности алмазного круга после 15 мин шлифования твердого сплава ВК8 показал, что засаленный слой формируется из вольфрама, который сосредоточен на боковых поверхностях алмазного зерна (рис. 7).

Это позволяет сделать вывод, что первыми очагами засаливания являются алмазные зерна, через которые происходит контакт с обрабатываемой поверхностью. Связка также вносит существенный вклад в процесс засаливания за счет химической активности, входящих в ее состав элементов.

Рентгеноструктурный анализ поверхности алмазного круга после 15 мин шлифования твердого сплава ВК8 всухую (рис. 8) показал наличие засаленного слоя, состоящего из фаз карбида вольфрама WC и сложного карбида $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$. Свидетельством того, что засаленный слой частично скрывает поверхность алмазного круга, служит наличие фаз углерода C (алмаза) и элементов, входящих в состав связки. Такими фазами являются твердые растворы меди и олова $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$, $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$, $\text{Cu}_{5,6}\text{Sn}$, $\text{Cu}_{0,932}\text{Sn}_{0,068}$ и фаза меди Cu.

Оптическое изображение участков поверхности алмазного круга после 30 минут шлифования твердого сплава ВК8 без СОЖ позволила установить, что засаленный слой полностью скрывает алмазные (рис. 9).

Такая поверхность фактически не работоспособна, образовавшийся засаленный слой препятствует обновлению алмазных зерен и по мере их истирания и разрушения полностью покрывает поверхность шлифовального круга. Над поверхностью круга выступают вершины отдельных алмазных зерен, которые работают непродолжительное время и изнашиваются до уровня засаленного слоя. В результате, процесс шлифования переходит в пластическое деформирование, что приводит к дефектам и разрушению обрабатываемой поверхности.

Топографический анализ образца алмазного круга после 30 мин шлифования без СОЖ (рис. 10), также показал, что поверхность шлифовального круга полностью скрыта засаленным слоем. Средняя величина его составляет 10 мкм, а на отдельных участках достигает порядка 20 мкм.

Проведенный спектральный анализ образца алмазного шлифовального круга после 30 минут шлифования твердого сплава ВК8 всухую показал, что на поверхности образуется засаленный слой, строение которого определяется составом обрабатываемого материала.

Анализ спектра (рис. 11), взятого с точки возле алмазного зерна, позволил определить, что засаленный слой состоит из кобальта, который является связующим в твердом сплаве, и вольфрама.

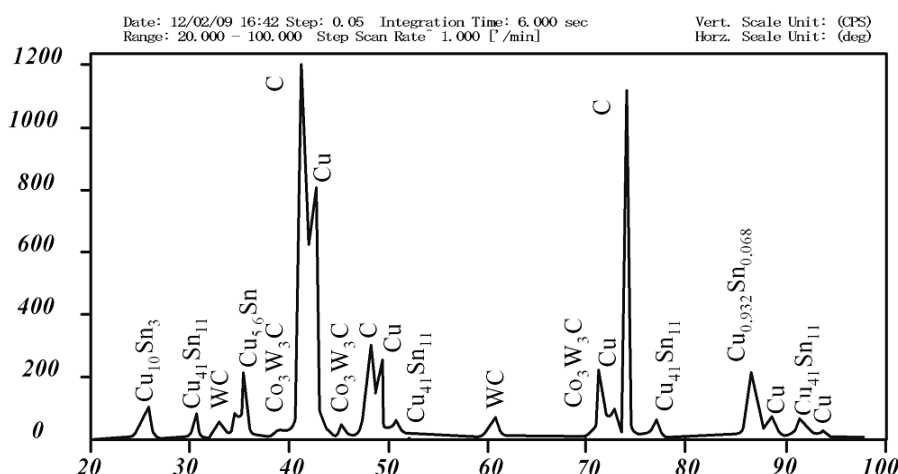


Рис. 8. Рентгенограмма участка поверхности алмазного круга после 15 мин шлифования без СОЖ

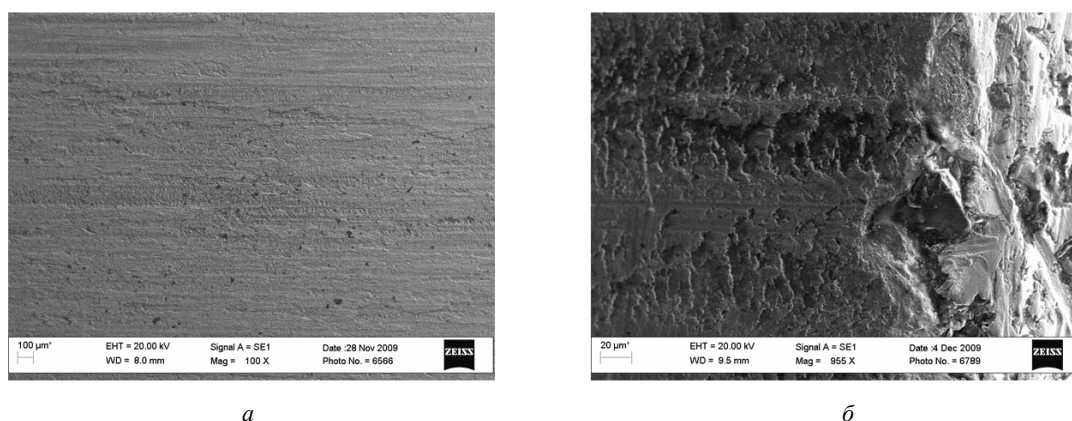


Рис. 9. Участки поверхности алмазного круга после 30 минут шлифования без СОЖ:
а — прямое изображение; б — изометрическое изображение

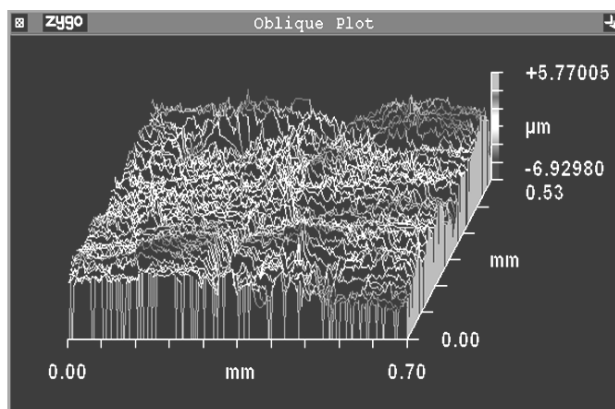


Рис. 10. Топографическое изображение участка поверхности алмазного круга после 30 мин шлифования без СОЖ

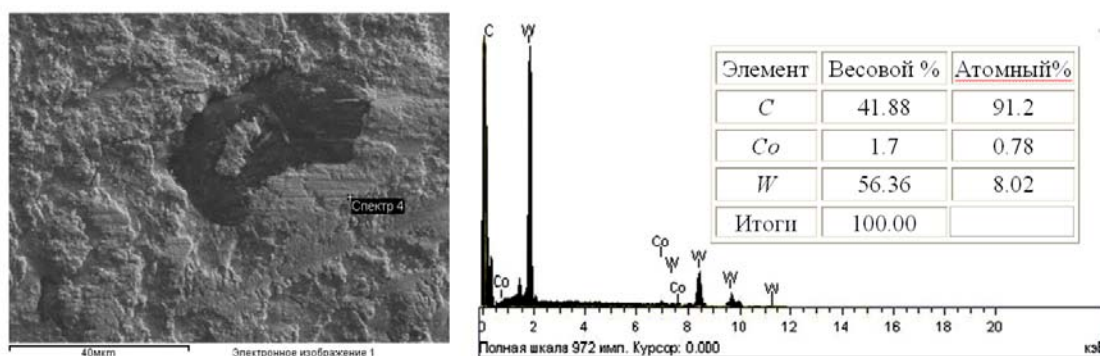


Рис. 11. Спектральный анализ участка поверхности алмазного круга после 30 мин шлифования без СОЖ

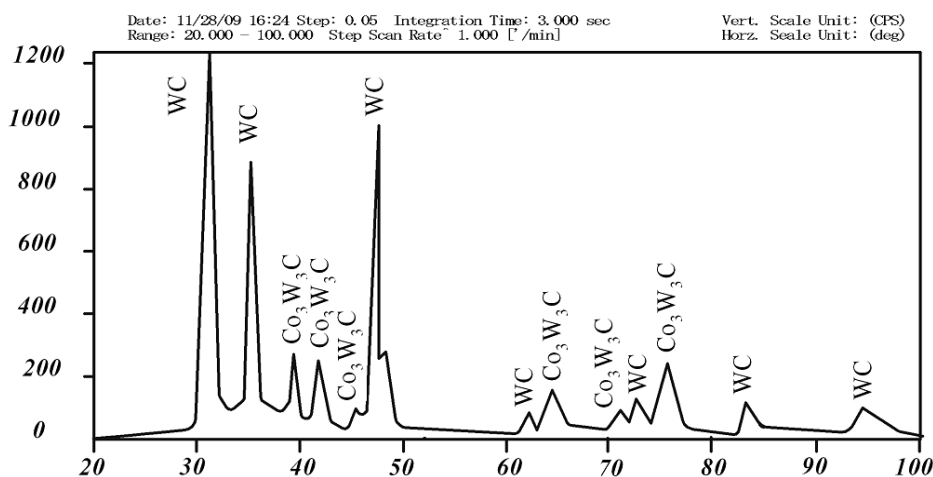


Рис. 12. Рентгенограмма участка поверхности алмазного круга после 30 минут шлифования без СОЖ

Рентгеноструктурный анализ подтверждает, что алмазные зерна круга покрыты засаленным слоем и такая поверхность алмазного инструмента неработоспособна. На рентгенограмме отмечено образование фаз карбида вольфрама WC и сложного карбида вольфрама $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ (рис. 12), так называемой фазы η , представляющей собой двойной карбид вольфрама и кобальта. Образование фазы $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ может свидетельствовать о деструкции карбида вольфрама WC в поверхностном слое твердого сплава.

Проведенные исследования засаленного слоя, полученные многочисленные снимки, спектрограммы, а также рентгенограммы с поверхности алмазных кругов, позволяют предположить следующее: очевидно, что процесс засаливания шлифовальных кругов зависит от структуры и состава связки кругов и обрабатываемого материала. Очевидно, что процесс засаливания зависит не только от термодинамических параметров, но и от атомно-молекулярных связей, которые формируют структуру взаимодействующих мате-

риалов. Поэтому засаленный слой предлагается рассматривать как двойной электрический слой.

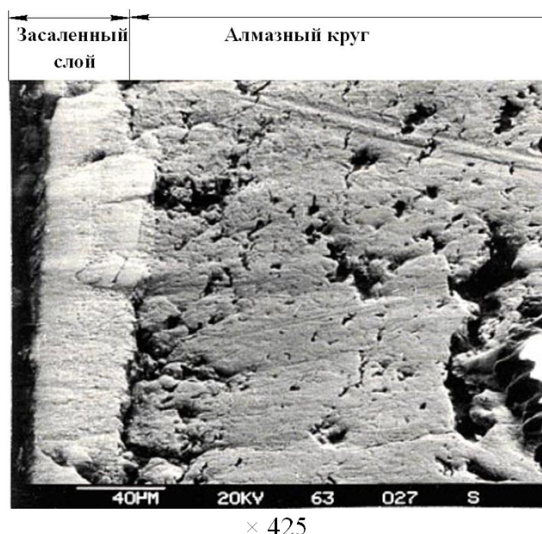


Рис. 13. Размеры засаленного слоя на поверхности алмазного круга после шлифования сплава ВК8 без СОЖ

Согласно экспериментальным данным [1; 3; 5; 8; 9] при исследовании контактных процессов шлифования алмазными кругами на металлической связке твердых сплавов максимальная величина засаленного слоя составляет порядка 30...40 мкм. В результате теоретического расчета, основанного на образовании двойного электрического слоя на границе контакта алмазного шлифовального круга с обрабатываемой деталью, получена величина засаленного слоя равная 31 мкм [5; 8]. Эта величина хорошо видна на приведенной фотографии, полученной при исследовании поверхности алмазного круга и образовании на ней границ засаленного слоя (рис. 13).

Проблема засаливания кругов при шлифовании должна решаться на атомном уровне с учетом атомно-молекулярных взаимодействий в промежуточном слое между контактирующими поверхностями шлифовального круга и обрабатываемой детали, который неизбежно образуется при обработке.

Таким образом, при шлифовании необходимо создать условия в зоне резания, при которых взаимодействие связки и детали не будет сопровождаться образованием засаленного слоя. Такими условиями может служить подвод СОТС, периодическая правка шли-

фовального круга и использование комбинированных методов электроалмазного шлифования.

Библиографические ссылки

1. Лобанов Д. В., Янюшкин А. С. Влияние методов затачивания на качество твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов // Вестник машиностроения. 2011. № 3. С. 50–53.
2. Янюшкин А. С., Лобанов Д. В., Рычков Д. А. Сравнительный анализ конструкций фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 3. С. 83–85.
3. Янюшкин А. С., Лобанов Д. В., Батаев В. А., Архипов П. В., Медведева О. И. Исследование работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 7. С. 87–91.
4. Архипов П. В., Янюшкин А. С., Ковалевский С. В. О природе засаливания шлифовальных кругов // Труды Братского государственного университета. Серия. Естественные и инженерные науки развитию регионов Сибири. 2008. № 2. С. 169–174.
5. Янюшкин А. С., Архипов П. В., Торопов В. А. Механизм процесса засаливания шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2009. № 3. С. 62–69.
6. Гордон М. Б., Янюшкин А. С. Высокоэффективная электрохимическая обработка твердых сплавов в режиме самозатачивания алмазного круга и одновременного травления поверхности изделий // Вестник машиностроения. 2009. № 3. С. 78.
7. Янюшкин А. С., Шоркин В. С. Роль адгезии и диффузии в процессе засаливания алмазных кругов на металлической связке // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2004. № 7. С. 32.
8. Янюшкин А. С., Архипов П. В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала // Технология металлов. 2010. № 1. С. 25–33.
9. Янюшкин А. С., Архипов П. В., Ереско С. П. Качество поверхности твердого сплава при комбинированном электроалмазном шлифовании с непрерывной правкой круга // Научные технологии в машиностроении. 2012. № 5. С. 26–31.

© Янюшкин А. С., Лобанов Д. В.,
Архипов П. В., 2013

РАЗДЕЛ
4



ЭКОНОМИКА



УДК 336.761.5

АНАЛИЗ ТЕОРИЙ О СОСТОЯНИИ ФОНДОВОГО РЫНКА

В. М. Аврамчиков, А. Н. Антамошкин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: opk11@yandex.ru

Проведен анализ классических теорий о состоянии рынка ценных бумаг, определены их аналитические возможности и выделены нерешенные проблемы. Сделан вывод о том, что ни одна из теорий рынка ценных бумаг не рассматривает его внутреннее устройство, которое является ключом к его правильному пониманию.

Ключевые слова: рынок ценных бумаг, акция, цена финансового инструмента, теории о состоянии фондового рынка.

ANALYSIS OF STOCK MARKET STATE THEORIES

V. M. Avramchikov, A. N. Antamoshkin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: opk11@yandex.ru

The authors carry out analysis of classical stock market state theories, define their analytical opportunities and allocate the unresolved problems and make a conclusion that none of the stock market state theories considers its internal arrangement, which is a key to its correct understanding.

Keywords: stock market, action, price of a financial instrument, stock market state theories.

Рыночная экономика состоит из множества взаимосвязанных элементов и является сложной иерархической структурой, в состав которой входят и российская торговая система, включающая фондовый, товарный и валютный рынки. Американский экономист Пол Самуэльсон определил фондовый рынок как место, где ведется организованная торговля ценными бумагами, т. е. фондовый рынок – это элемент рыночной инфраструктуры, координирующий деятельность покупателей (предъявителей спроса) и продавцов (поставщиков) по поводу купли и продажи активов фондового рынка (ценных бумаг) [1].

Фондовый рынок в широком смысле – это элемент рыночной инфраструктуры, который, с одной стороны, инвестирует реальный сектор экономики, предоставляя предпринимателям возможность получения финансовых ресурсов для осуществления их производственно-хозяйственной деятельности, с другой – решает свои собственные задачи, реализуя функции, направленные на получение прибыли от операций с ценными бумагами.

Российский фондовый рынок – это молодой, динамично развивающийся субъект рыночной экономики, применяющий современные технологии и использующий мировой опыт биржевой торговли.

Теории о состоянии рынка ценных бумаг (Market Theories) составляют неотъемлемую часть аналитического инструментария фондового рынка. Их использование позволяет разработать качественные методики исследования движения цен на финансовые инструменты и определить оптимальный момент открытия торговой позиции при совершении операций с цен-

ными бумагами. Вместе с тем процесс формирования цен на финансовые инструменты на фондовом рынке, как отмечают многие ученые и аналитики, неполностью, а иногда и вовсе не соответствует существующим моделям формирования цен, и в этом процессе не прослеживаются явные закономерности [2].

Основная цель преобладающего числа классических теорий – выявление основных направлений движения фондового рынка, которые формируются в течение продолжительного периода времени и, как правило, связаны с заметными изменениями цен. В данном исследовании была проведена оценка аналитических возможностей и нерешенных проблем в теоретических положениях основных классических теорий в области исследования состояния рынка, на основе которых развивалось большинство методов технического анализа. Рассмотрим основные положения самых известных теорий о состоянии рынка ценных бумаг. Результаты данного исследования представлены в таблице.

Проведенный анализ теоретических положений известных теорий о состоянии фондового рынка, лежащих в основе методик исследования движения цен, свидетельствует, что каждая теория содержит рациональные моменты, и при составлении прогноза состояния рынка и повышении его достоверности целесообразно использовать сочетание положений нескольких теорий.

Какая или какие из теорий будут выбраны, зависит целиком и полностью от ее восприятия и точки зрения соответствующего аналитика. Выдвижение одной теории в ранг единственной и лучшей было бы ошибкой. Однако опираясь на результаты исследований

торговых стратегий и теорий о состоянии рынка ценных бумаг многих аналитиков, можно сделать вывод о том, что с учетом расходов на финансовых посред-

ников в долгосрочном периоде результаты инвестирования будут хуже, чем при тактике Buy & Hold («купи и держи»).

Краткая характеристика и оценка аналитических возможностей основных теорий о состоянии фондового рынка

Автор и краткая характеристика теории	Аналитические возможности и не решенные проблемы
<i>Теория Доу</i>	
Теория создана в 1900 г. американским общественным деятелем Чарлзом Доу (Charles Dow), утверждавшим, что любая тенденция движения цен на фондовом рынке должна быть подтверждена аналогичным изменением промышленного и транспортного индексов [3]. Основные положения теории Доу заключаются в следующем. 1. В промышленном и транспортном индексах содержится наиболее значимая информация о рынке, и именно они формируют рыночный спрос и предложение на акции. 2. Основными трендами рынка являются: первичный – долгосрочный тренд цен акций, неспособный долгое время двигаться в одном и том же направлении; вторичный – приходит на смену первичному, более длительному, и корректирует его; производные или малые тренды, представляющие собой ежедневные колебания цены, которыми руководствуются участники рынка при выборе торговой позиции. 3. Растущие первичные тренды («бычьи» рынки) основаны на трех движениях вверх: первое – скупка и накопление акций инвесторами, обусловленные ростом цен в период упадка экономики; второе – скупка инвесторами акций при повышении доходов компании; последнее движение роста, как следствие благоприятной рыночной конъюнктуры – массовая покупка акций населением. 4. Падающие первичные тренды («медвежьи» рынки) основаны на трех движениях вниз: первое обусловлено продажами акций инвесторов при высокой стоимости акций, так как в этих условиях темпы роста доходности компании будут нестабильны; второе обусловлено выходом продавцов из рынка в связи с отсутствием покупателей; последнее движение цен вниз вызвано массовой продажей акций с целью сохранения денежных средств. 5. Изменение индексов является взаимообусловленным. Подъем промышленного и транспортного индексов выше максимумов их предыдущих объемов продаж к «медвежьему» тренду является сигналом о начале «бычьего» тренда. Падение как промышленного, так и транспортного индексов до уровня ниже минимумов их предыдущих вторичных объемов продаж к «бычьему» тренду рассматривается как сигнал о начале «медвежьего» тренда. 6. Для формирования индексов берутся во внимание только цены закрытия рынков, не принимая во внимание ценовые движения, имевшие место в течение дня. 7. Основным объектом анализа является первичный тренд, и он считается действительным до тех пор, пока сигнал о его изменении не будет подан обоими индексами. Теоретические положения данной теории в дальнейшем были положены в основу технического анализа	Положения теории Ч. Доу в дальнейшем были взяты за основу расчета индексов Доу-Джонса – промышленного (Dow-Jones Industrial Average) и железнодорожного (Dow-Jones Railroad Average). Они рассчитываются следующим образом: складываются курсы акций железнодорожных и промышленных компаний, и полученная сумма делится на количество данных компаний. Индексы Доу-Джонса подчинены следующей тенденции: рост спроса на продукцию, связанного с ее транспортировкой до рынка, влечет за собой рост транспортного индекса, и, наоборот, уменьшение спроса обуславливает уменьшение перевозок товара, и значения транспортного индекса падают. В совокупности индексы Доу-Джонса являются аналитическим инструментом, измеряющим направление движения цены <i>Проблема:</i> данная теория не содержит специфических критериев изменения движения цены
<i>Теория «случайных блужданий», или теория «ходьбы наугад» (Random Walk Hypothesis)</i>	
Данная гипотеза была выдвинута в 1900 г. французским математиком Луи Башелье (Louis Bachelier) [4]. Теория «ходьбы наугад» содержит следующие дополняющие друг друга положения: 1. Приращение цены любой акции является величиной случайной, в связи с этим отсутствует статистическая зависимость между изменениями цены в разные периоды времени, т. е. коэффициент корреляции приращения цены биржевого актива для разных периодов времени равен нулю, при этом сегодняшнее изменение цены никак не зависит от вчерашнего изменения цены. 2. Доходность распределена в течение всех периодов времени идентично. Это означает, что получение половины прибыли для каждого периода времени будет одинаковым. Автор теории утверждает, что внутренняя стоимость каждой акции (Intrinsic Value) основывается на предположениях инвесторов о размере ее будущей доходности. Последняя самая достоверная информация о состоянии и перспективах развития компании – эмитента ценных бумаг отражена в цене ее акции и является основной, а все следующие за ней изменения цены акции являются случайными колебаниями, не зависящими от предыдущих изменений ее цены. В этой связи,	Согласно данной теории на рынке при определении цены действует принцип случайно выбранных чисел, поэтому значения цены любой акции нельзя прогнозировать на будущий период, используя ретроспективные данные о движении цены, так как рыночная информация об уровне цены случайна. <i>Проблема:</i> выводы сделаны в рамках только статистических исследований без учета экономических факторов

Автор и краткая характеристика теории	Аналитические возможности и не решенные проблемы
согласно данной теории, при прогнозировании рыночных цен акций на будущий период нельзя использовать данные об изменении цены, имевшем место в предыдущем периоде	
<i>Теория «ширины рынка», или теория соотношения подъема и спада (the Advance-Dcline Theory или Breadth of the Market)</i>	
Французский математик Луи Башелье (Louis Bachelier), в начале XX в., анализируя рынок государственных ценных бумаг, сделал вывод о непредсказуемости изменения цен, следующих законам «случайных блужданий», т. е. он утверждал, что на изменение цены последующих периодов не влияют цены предыдущих периодов [5]. Данное положение лежит в основе теории «ширины рынка», или теории соотношения подъема и спада, предполагающей сопоставление количества акций, цены на которые понизились, с количеством акций, цены на которые возросли, т. е. анализируется доля акций, участвующих в динамике конъюнктуры рынка. Согласно данной теории, рынок считается широким, если цены 2/3 котированных на бирже акций в течение торгового периода движутся в одном направлении. Утверждается также, что индексы подъема или спада являются индексами цен «ширины рынка», так как тенденции при наличии «широкого рынка» из-за участия большего числа инвесторов более длительны и более значимы, чем на ограниченном (узком) рынке	При сопоставлении количества акций, цены на которые понизились, и количества акций, цены на которые поднялись, происходит сопоставление рыночных тенденций, так как они отражают общее направление движения рынка <i>Проблема:</i> данная теория не обосновывает наступление момента наиболее выгодной покупки или продажи данных ценных бумаг
<i>Теория эффективного рынка (Efficient Market Theory)</i>	
В XX в. финансовый теоретик и аналитик Е. Фама сформулировал основные положения теории эффективного рынка. Согласно данной теории предполагается, что рынок является эффективным, если его цены отражают всю доступную информацию и быстро на нее реагируют, и поэтому условием поддержания равновесия рынка является его способность к быстрой реакции [6]. Автор данной теории делает предположение о наличии двух видов рыночной эффективности: 1) рабочей (Operationally) эффективности, предполагающей последовательное поступление торговых сигналов и своевременную их обработку на рынке; 2) информационной (Informationally) эффективности, обеспечивающей быстрое реагирование цены акций на новую информацию. Е. Фама сформулировал и обосновал критерии для разграничения отдельных форм информационной эффективности: – Слабая форма (Weak Form Efficiency), при которой прогноз движения с помощью анализа ретроспективных значений цены акций не имеет смысла, так как цены меняются в соответствии с теорией «случайных блужданий». – Средняя форма (Semi-Strong Form Efficiency), предполагающая отражение ценами за каждый период времени всю общедоступной информации (Public Information), которая оказывает влияние на принятие инвестиционного решения. Эта форма эффективности дает возможность получать наибольшую прибыль инвесторам, обладающим данной информацией, так как проявляется в быстром реагировании цен финансовых инструментов на новую информацию об эмитентах, акциях или корпоративных событиях. – Сильная форма (Strong Form Efficiency), при которой цены данного рынка полностью и за каждый период времени отражают всю информацию, как частную (Private), так и общедоступную (Public Information). Частная или внутренняя информация (Inside Information) не публикуется в СМИ и, как правило, содержит закрытую информацию о деятельности частных компаний или данные служебного пользования. Таким образом, в основе теории эффективности рынка лежит утверждение о том, что цены рынка учитывают все имеющиеся знания и ожидания инвесторов.	Данная теория утверждает, что все изменения в информации о рынке находят отражение в ценах акций, что позволяет лицам, располагающим большей информацией, получать большую прибыль. При сильной информационной эффективности рыночные цены своевременно отражают и частную информацию, которую согласно нормам бизнес-этики, не следует использовать для извлечения прибыли <i>Проблема:</i> информационная эффективность рынка основана на информационной прозрачности и отсутствии искусственных информационных препятствий. В практической деятельности данные условия не всегда возможно обеспечить
<i>Фрактальная теория</i>	
Фрактальная теория возникла во второй половине XX в. Ее основоположником является французский математик Бенуа Мандельброт. Им была прослежена симметрия в длительных и кратковременных колебаниях цены и сделан вывод, что произвольные внешне колебания цены следуют скрытому математическому порядку во времени и не могут быть отражены стандартными кривыми графиков [7]. Автор теории ввел понятия «фрактал» (Fractus) и «самоподобное множество», рассматриваемое как объединение одинаковых непересекающихся подмножеств. Согласно определению Мандельброта фрактал – это бесконечно самоподобная геометрическая фигура, масштабная инвариантность которой может быть либо точной, либо приближенной	Согласно данной теории случайные изменения в поведении отдельных элементов системы (фракталов) в начале их возникновения ведут к изменению поведения всей системы (движения цены), что не позволяет прогнозировать точное поведение всей системы в дальнейшем

Автор и краткая характеристика теории	Аналитические возможности и не решенные проблемы
	<i>Проблема:</i> подмножества самоподобных множеств содержат произвольно малые масштабы и являются слишком нерегулярными, чтобы быть описанными на традиционном геометрическом языке
<i>Теория суммы (доли) «коротких» продаж акций, или теория временно проданных акций</i>	
Теоретико-методическая разработка, основанная на уже имеющихся положениях теорий о состоянии рынка ценных бумаг, в основе которой лежит предположение, что имеет место продажа и покупка акций, по сути не принадлежащих инвестору и взятых в займ у брокера. Инвестор, продавая акции по действующей в настоящий момент рыночной цене и оставаясь с открытой позицией (Open Position), через определенный промежуток времени выкупает их обратно, но по более низкой цене и затем закрывает торговую позицию (Close the Position). «Короткая», или срочная, продажа с открытой торговой позицией ценных бумаг, не принадлежащих инвестору, и дальнейшая покупка их по более низкой цене дают ему возможность получить прибыль; если же цена возрастет, инвестор получит убыток. Использование данной теоретической разработки дает возможность установить число акций, еще не выкупленных (Short Interest) и не возвращенных законным владельцам, но проданных в данный момент времени с целью дальнейшего выкупа. [5]. Если невозможно своевременное изъятие ценных бумаг из оборота, то согласно данной теоретической разработке можно перевести открытую торговую позицию из одного финансового года на другой	Большое количество проданных «коротких» акций можно рассматривать как индикатор того, что необходима обратная покупка акций, которая произойдет, когда цена проданных акций снизится и их покупка и закрытие торговой позиции выгодны инвестору. Данная операция будет способствовать также увеличению спроса и росту цен на акции <i>Проблема:</i> периодическое сравнение котировок акций с биржевыми индексами составляет практическую сложность
<i>Теория неполного количества акций (The Odd-Lot Theory)</i>	
Теоретико-методическая разработка, основанная на уже имеющихся положениях теорий состояния рынка ценных бумаг. Данная методика обосновывает существование двух основных методов группировки акций при осуществлении операций с ними [5]: 1. Группировка акций в группы с количеством акций 100 и больше – полные группы (Round Lots или Normal Trading Unit). 2. Группировка акций в группы с количеством акций от 1 до 99 – неполные группы (Odd-Lots). Согласно данной теоретической разработке, при выборе времени для открытия торговой позиции инвестору необходимо учитывать, что при использовании полных групп акций выплачиваемые им комиссионные ниже, чем в неполных группах. Специализированные дилеры, осуществляющие операции с неполными лотами (Odd-Lot Dealers), покупая полные лоты, дробят их и перепродают как неполные брокерам. Брокеры, в свою очередь, перепродают неполные лоты частным инвесторам и взимают с них наряду с обычными комиссионными специальную дифференцированную комиссионную наценку за неполный лот. Данная теоретическая разработка имеет особое значение для профессиональных участников рынка при определении ими рыночной стратегии и проведении анализа поведения мелких и неопытных инвесторов на рынке, у которых нет средств для покупки полного лота	С помощью теоретической разработки неполного количества акций отслеживается индекс, показывающий долю операций с небольшими лотами в общем объеме биржевых операций <i>Проблема:</i> так как информация с выбором времени операций обычно опаздывает, составляет трудность отслеживание небольших лотов для определенных групп ценных бумаг или одной акции

Проведенный анализ теоретических положений известных теорий о состоянии фондового рынка, лежащих в основе методик исследования движения цен, свидетельствует, что каждая теория содержит рациональные моменты, и при составлении прогноза состояния рынка и повышении его достоверности целесообразно использовать сочетание положений нескольких теорий.

Какая или какие из теорий будут выбраны, зависит целиком и полностью от ее восприятия и точки зрения соответствующего аналитика. Выдвижение одной теории в ранг единственной и лучшей было бы ошибкой. Однако опираясь на результаты исследований

торговых стратегий и теорий о состоянии рынка ценных бумаг многих аналитиков, можно сделать вывод о том, что с учетом расходов на финансовых посредников в долгосрочном периоде результаты инвестирования будут хуже, чем при тактике Buy & Hold («купи и держи»).

Резюмируя краткий обзор теорий о состоянии фондового рынка курса акций, хочется подчеркнуть, что, на наш взгляд, для них характерен поверхностный подход к исследуемой проблематике. Так, например, ни одна из теорий рынка акций не рассматривает внутреннее устройство (морфологию) этого рынка, тогда как именно морфология рынка является

ключом к определению закономерностей движения цены на финансовые инструменты и правильному пониманию направлений повышения достоверности их прогнозирования. В связи с вышесказанным необходимо отметить, что существующие методики прогнозирования движения цен финансовых инструментов, базирующиеся на рассмотренных в данной статье положениях теорий о состоянии фондового рынка, не учитывают специфические особенности и свойства временных рядов фондового рынка, не содержат однозначного алгоритма действий для инвестора при занятии им торговой позиции. Всё это вызывает затруднения у инвесторов при формировании инвестиционного плана действий [8].

В этой связи вопросы разработки инструментов и методов прогнозирования изменения курса цены на фондовые активы являются актуальными и востребованными.

Решение проблем в определении закономерностей направления движения цены на финансовые инструменты состоит в изучении внутренних (эндогенных) свойств значений временного ряда фондового рынка, установлении новых информационно-математических связей между ними, позволяющих модифицировать их значения и провести количественную и качественную оценку его прогноза.

По нашему мнению авторов, повышению достоверности прогнозирования состояния рынка и оценке вероятностного направления движения цены финансовых инструментов будет способствовать:

- проведение алгоритмизации процесса прогнозирования от поступления исходных данных цены на товар до момента занятия торговой позиции, что позволяет четко систематизировать и упорядочить действия инвестора;
- модификация значений временного ряда цены финансового инструмента, что позволяет выявить внутренние информационно-математические связи между значениями временного ряда и иметь численное представление об успехе занимаемой торговой позиции и времени ожидания ее результатов;
- использование кластерного анализа при модификации значений временного ряда, дающего воз-

можность определения факторов, влияющих на точность прогноза: мощность выборки данных, зависимость правдоподобности прогноза от мощности (объема) выборки данных значений временного ряда, диапазон распределения признаков модифицированных данных (время формирования ценового образа и разница между наибольшим и наименьшим значением цены (размах) финансового инструмента).

Выявление и использование данных специфических свойств, присущих значениям временного ряда, позволяет с достаточной точностью выявить вероятностное поведение новых его значений и ответить на основной вопрос: где, с какой вероятностью и когда исследуемый временной ряд при прогнозировании изменения курса цены на конкретный фондовый актив примет определенное значение.

Библиографические ссылки

1. *Могги Р., Швагер Дж.* Технический анализ: полный курс. М. : Альпина Паблишерз, 2010.
2. *Мэрфи Д. Дж.* Технический анализ фьючерсных рынков. М. : Сокол, 1996.
3. *Резго Г. Я., Кетова И. А.* Биржевое дело. М. : Финансы и статистика, Инфра-М, 2010.
4. *Артеев Д. С.* Методические подходы к оценке эффективности фондового рынка на основании гипотезы «случайного блуждания» // Перспективы управления экономикой и маркетинг организации. 2010. № 10. С. 112–114.
5. *Хмыз О.* Основные теории состояния рынка бумаг // РЦБ. 2006. № 20. С. 35–38.
6. *Моисеев С. Р., Ключников М. В., Пищулин Е. А.* Финансовая статистика: денежная и банковская. М. : КноРус, 2010.
7. *Томас Р. Демарк.* Технический анализ – Новая наука. М. : Евро, 2008.
8. *Аврамчиков В. М.* Методы оценки вероятностного направления движения временных рядов на фондовом рынке // Фундаментальные исследования. 2012. № 6 (1). С. 214–217.

© Аврамчиков В. М., Антамошкин А. Н., 2013

УДК 338.14: 330.35

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЫНОК ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСЛУГ КАК СФЕРА ИНТЕРЕСОВ РОССИЙСКОЙ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

О. Б. Воейкова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: olgavoeikova@yandex.ru

Рассматриваются актуальные вопросы интеграции российской высшей школы в мировое образовательное пространство. Дается развернутое определение международного рынка образовательных услуг, а также анализируются основные проблемы, встающие перед отечественными вузами при включении в этот глобальный рынок.

Ключевые слова: российская высшая школа, международный рынок образовательных услуг и его теоретико-методологическое обоснование.

INTERNATIONAL MARKET OF EDUCATIONAL SERVICES AS THE SPHERE OF INTERESTS OF RUSSIAN HIGHER SCHOOL

O. B. Voeykova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: olgavoeykova@yandex.ru

The article considers actual problems of integration of Russian higher school into the world educational space. The authors give full determination of international market of educational services and analyze the basic problems, which home VUZes (Institutes of Higher Education) face in the process of joining the global market.

Keywords: Russian higher school, innovative university, international market of educational services and its theoretical-methodological substantiation.

Вступление человечества в XXI в. было ознаменовано переходом к новому этапу развития, характеризующемуся активным включением науки и образования в систему производительных сил, что привело к превращению научно-образовательной сферы в одну из отраслей народного хозяйства – индустрию знаний. Одновременно с этим, нарастающие процессы глобализации, обуславливающие формирование единого мирохозяйственного комплекса, значительно увеличивают поляризацию между развитыми и развивающимися странами под влиянием формирования знаниевой экономики, поскольку международное разделение труда, лежащее в основе глобализации, приводит к усилению позиций развитых стран, с доминирующими позициями работников высококвалифицированного труда в квалификационной структуре совокупного работника. Развивающиеся страны характеризуются преобладанием работников малоквалифицированного труда в профессионально-квалификационной структуре своих экономик, что отбрасывает их на задворки новой цивилизации и мирового глобального хозяйства. Международные позиции той или иной страны все больше зависят от развития таких факторов, как уровень образованности и профессиональной квалификации, социальные потребности и трудовая мотивация и др.

В этой связи повышается значимость системы образования и, в частности, высшей школы как основного производителя главного ресурса и фактора новой экономики, основанной на знании – человеческого капитала. Увеличение спроса на высшее образование привело к тенденции его массовизации. По данным ЮНЕСКО, численность студентов высших учебных заведений мира с 13 млн человек в 1960 г. увеличилась до 28 млн в 1970 г., с 46 млн в 1980 г. до 65 млн в 1991 г. и 82 млн человек в 2000 г. За 40 лет количество студентов в мире выросло в 6 раз. Во всех развитых странах не только среднее образование является всеобщим, но во все возрастающей степени и высшее образование становится для большей части молодежи обязательным [1].

Начиная с 60-х годов двадцатого столетия, благодаря теоретическим разработкам доктрины «человеческого капитала» образование, первоначально относившееся к культурной, надстроечной сфере, становится предметом экономического анализа, перестав

быть областью для изучения только социальных, философских и педагогических наук. Примерно в это время начинает формироваться международный рынок образовательных услуг, ведущими экспортерами которого становятся такие развитые страны как США, Великобритания, Германия, Франция. В настоящее время потребителями этого рынка в лице иностранных граждан являются около 5 млн человек, а его объем достигает 50 млрд долл. США [2]. В странах ОЭСР доля иностранных студентов в общей численности студентов вузов в 2006 г. составляла в среднем 6,2 %, максимальное значение этого показателя 28,3 % было достигнуто в Новой Зеландии. Российская высшая школа (ВШ) в значительной мере уступала по численности иностранных студентов странам ОЭСР, уровень этого показателя для России менялся незначительно за период с 2006 по 2009 гг. и составлял от 1,4 до 1,6 % соответственно. На начало 2010 г. доля иностранных студентов в общем числе студентов российских вузов составила 1,8 %, или в абсолютных цифрах – 113 823 человека, из которых 76, 250 тыс. человек – граждане стран СНГ, Балтии и Грузии [3].

Формирование единого планетарного рынка образовательных услуг ведет к ликвидации препятствий в получении гражданами разных стран, вне зависимости от их места пребывания, образования, достаточного для их своевременной адаптации к перманентным изменениям, происходящим в глобализующемся пространстве. Предлагаемые на данном рынке образовательные услуги должны позволить потребителям в лице иностранных граждан приспособиться к таким эпохальным изменениям, как переход к информационному обществу, отмирание потребности в кадрах традиционных отраслей экономики и рост потребности в кадрах, владеющих инновационными технологиями, а также формирующийся в рамках рынка труда новый сегмент – интеллектуальный труд.

Можно констатировать, что в настоящее время уже сложился такой наднациональный институт, как международный рынок образовательных услуг, пока еще не получивший своего теоретико-экономического обоснования и формально-правового подкрепления.

Международный рынок образовательных услуг в свете общетеоретических представлений. Международный рынок образовательных услуг как новый феномен мирового экономического развития требует

своего теоретического осмысления и, в первую очередь, определения его в свете экономических представлений.

Исходя из общих положений экономической теории, определяющих рынок в целом как сферу экономических отношений между людьми по поводу купли-продажи товаров и услуг, основанную на принципах добровольности и равенства в обмене, можно определить сущность образовательного рынка вообще. Однако прежде всего необходимо установить, что именно является предметом, относительно которого возникают отношения купли-продажи на рынке образования. Можно ли утверждать, что предметом сделки в данном случае является товар в специфической форме знания, или же это образовательная услуга, что также представляется достаточно правомерным.

Не углубляясь в научные дискуссии по этому поводу, остановимся на определении образовательной услуги, предложенном О. В. Галайда [4], которая считает, что «образовательная услуга – это экономическая и социально значимая категория, представляющая собой действие или деятельность, в процессе которой одно лицо (исполнитель, поставщик, продавец услуги) передает другому лицу (заказчику, покупателю, потребителю услуги) комплекс информации и знаний, нацеленный на развитие личности, духовный и интеллектуальный рост, овладение профессиональными умениями и навыками, приобщение к опыту человечества, воплощенному в определенных научных, культурных и духовных идеях, концепциях и открытиях». Данное определение является достаточно емким и содержательным и, на наш взгляд, позволяет однозначно трактовать рассматриваемый рынок как рынок образовательных услуг.

Дальше, следуя вышеприведенной логике рассуждения, получим следующее определение: *рынок образовательных услуг – это сфера экономических отношений между продавцом и покупателем по поводу купли-продажи образовательной услуги на принципах добровольности и равенства в обмене.*

Необходимо уточнить, что в основе рынка лежит обмен, являющийся одновременно формой экономических связей между хозяйствующими субъектами в условиях общественного разделения труда. Причем обмен принимает форму рынка только при реализации товарно-денежных отношений. В соответствии с данным уточнением *рынок образовательных услуг – это экономическая форма обмена в системе товарно-денежных отношений, опосредующая включение благоприобретателя (покупателя, потребителя услуги) в образовательный процесс как специфическую форму интеллектуального труда и формирующая систему социально-экономических отношений по поводу этого включения.*

Все это позволяет утверждать, что рынок образовательных услуг – это рынок особого рода, на котором субъект, приобретающий услугу, одновременно включается в процесс интеллектуального труда, совместно с продавцом этой услуги, активно участвуя в улучшении ее качества. Данная дефиниция позволяет выявить важную роль самой образовательной услуги,

позволяющей покупателю этой услуги в ходе образовательного процесса сменить статус пассивного интеллектуального потребителя на статус равноправного партнера интеллектуального труда, расширяющего приобретаемый им «комплекс информации и знаний» собственными интеллектуальными продуктами. Это является особенно актуальным в связи с происходящими изменениями в сфере образования, обусловленными сменой образовательных парадигм, благодаря чему традиционная система образования уступает место формирующейся постиндустриальной, инновационно ориентированной модели, отличающейся высокой степенью креативности образовательного процесса с использованием последних достижений науки и техники [5].

Распространяя логику сделанных рассуждений на международный образовательный рынок и учитывая то, что главным способом предоставления услуг в сфере образования иностранным студентам является перемещение через границы как самих студентов, так и преподавателей, т. е. международная академическая мобильность, можно сделать соответствующее заключение: *международный рынок образовательных услуг – это сфера экономических отношений между продавцами и покупателями в лице вузов и студентов стран мира, в условиях географической удаленности и межнациональных различий, по поводу купли-продажи образовательных услуг на принципах добровольности и равенства в обмене.*

Или другое определение, расширяющее представление об исследуемом объекте, которое также можно считать правомерным. *Международный рынок образовательных услуг – это экономическая форма обмена в системе товарно-денежных отношений, опосредующая включение благоприобретателя (покупателя, потребителя услуги) в лице иностранного студента в образовательный процесс как специфическую форму интеллектуального труда и формирующая систему социально-экономических отношений между ним и продавцом услуги в лице зарубежного вуза по поводу этого включения.*

Такое определение международного рынка образовательных услуг позволяет иначе взглянуть на место покупателя услуги в лице иностранного студента, который включается не только в товарно-денежные отношения с продавцом услуги, но и в систему социально-экономических связей, а также становится полноправным участником процесса интеллектуального труда, в котором он занимает определенное место как производитель новых знаний в рамках инновационно ориентированного образовательного процесса, реализующего зарубежным вузом.

Проблемы интеграции российской высшей школы (ВШ) в международный рынок образовательных услуг. Интенсификация глобализационных процессов и необходимость интеграции российских вузов в мировой образовательный рынок являются для отечественной высшей школы одним из наиболее серьезных вызовов за всю ее предшествующую историю. Это обусловлено некоторыми особенностями становления и развития российской системы высшего

образования, национальными традициями, ее пока еще слабой адаптированностью к рыночной экономике, затянувшимся реформированием, нередко негативного характера, мешающим сохранению ее устойчивости.

Прежде всего, нужно отметить, что высшее образование с середины прошлого века развивается как экспортная отрасль, особенно в развитых странах, в то время как российская ВШ ранее практически не занималась экспортом своих образовательных услуг. Международная деятельность российских вузов исключала внешнеэкономический компонент, базировалась на принципах международного сотрудничества и взаимообмена, что выражалось в форме так называемой академической мобильности, которая заключается, главным образом, в обмене студентами, преподавателями университетов с целью развития межкультурных коммуникаций. Основная доля «экспорта» образовательных услуг со стороны российской ВШ приходилась на обучение студентов из сопредельных стран бывшего СССР и стран социалистического лагеря, но и эти услуги можно было бы считать не столько коммерческой деятельностью российских вузов, приносящей доход, сколько дружественной поддержкой и передачей культурных и образовательных традиций.

Объективной необходимостью присутствия российской ВШ на международном рынке образовательных услуг является не только получение прибыли от экспортной деятельности, но и достижение требуемого уровня конкурентоспособности в борьбе за потребителя образовательной услуги. При этом в настоящее время этот рынок уже поделен между сильными «игроками», странами – экспортерами образовательных услуг, чьи позиции подкреплены проработанной нормативной базой, расширяющей возможности зарубежных вузов (вступление в некоммерческие партнерства, работа на фондовых рынках и пр.), специальными вузовскими инфраструктурными подразделениями, обеспечивающими квалифицированную поддержку по организации экспорта образовательных услуг и передаче интеллектуальной собственности иностранным лицам (юридическим и физическим), накопленным опытом ведения деятельности в условиях рыночной среды.

Что касается российских вузов, то они сравнительно недавно начали участвовать в рыночных процессах. Исторически сложилось, что система высшей школы в нашей стране была жестко централизована, а потому не имела полной самостоятельности. Впоследствии это стало серьезной помехой для адаптации отечественных вузов к рынку, поскольку ведение рыночной деятельности предполагает определенную свободу и раскрепощенность, в то время как российская система высшего образования унаследовала от патерналистского советского периода такую устойчивую характеристику, как зависимость предпринимаемых действий от директив «сверху».

Кроме того, нужно учитывать, что советская высшая школа, из которой вышла современная система российского высшего образования, никогда не была

единой. Часть ее вузов были корпоративными, часть – ведомственными, причем некоторые корпоративные структуры имели разные, практически изолированные друг от друга системы высшего образования: подготовка государственно-партийных кадров в системе партийного образования, военное образование, подготовка дипломатического корпуса, кадров государственной безопасности и МВД и т. д. Шел процесс обособления подготовки специалистов для военно-промышленного комплекса, которая концентрировалась в немногочисленных вузах и их отделениях в закрытых городах [6]. Многие вузы практически находились под эгидой крупных корпораций и ведомств, что подкреплялось соответствующей материальной поддержкой через обновление материально-технической базы и финансовой подпиткой в форме хозяйственных договоров. С распадом Советского Союза в начале 90-х годов прошлого века и всей системы народного хозяйства, вузы остались не только оторванными от дополнительных материально-финансовых источников, но и разобщены внутри собственной системы, целостность которой была нарушена в силу сложившихся объективных и субъективных причин. Формирование в этот период негосударственного сектора высшего образования было встречено достаточно негативно со стороны руководства государственных вузов, считавших, что привнесение коммерческих начал в систему высшего образования приведет к ее разрушению и снижению интеллектуального потенциала общества. Но именно негосударственные вузы в определенной степени запустили механизм рыночной конкуренции в сфере образования, вынуждая государственные вузы повышать собственную конкурентоспособность. Реакция негосударственных вузов на изменения рыночного спроса по отдельным специальностям была более гибкой, чем у государственных. При этом государственные вузы, стремясь не утратить конкурентных качеств, открывали новые специальности, в результате чего система высшего образования получала практически недоступные ей до этого внебюджетные средства, способствующие ее выживанию в условиях экономического спада, а молодежи предоставлялась возможность получить нужное ей образование [7].

Государственные вузы еще в начале 90-х гг. получили право создавать предприятия, учреждения, организации различных организационно-правовых форм, вести предпринимательскую деятельность, заключать договоры, контракты, соглашения, в том числе и с зарубежными вузами и иными партнерами, что было отражено в Типовом положении об образовательном учреждении высшего профессионального образования (вузе). Однако реальные возможности по осуществлению коммерческой деятельности были получены отечественными вузами только после утверждения Федерального закона РФ от 2 августа 2009 г. № 217, разрешившего бюджетным вузам и НИИ создавать малые инновационные предприятия (МИП), что было подкреплено в начале 2011 года вступившим в силу Федеральным законом № 83-ФЗ, позволившем всем бюджетным учреждениям создавать

коммерческие предприятия в уведомительном, а не разрешительном порядке. Проблематичным является то, что слабая методическая и информационная поддержка вузам и МИП со стороны Рособразования обусловила возникновение большого количества неточностей и ошибок в действиях учебных заведений. Это привело к тому, что с момента подписания федерального закона треть малых предприятий при вузах существует лишь на бумаге. Так, экспертиза научно-образовательных учреждений на предмет соответствия закону 217-ФЗ показала, что из 1048 предприятий, внесенных в базу данных инновационных компаний при вузах и НИИ, реально подпадает под действие закона около трети из них [8].

Выход на международный рынок образовательных услуг является сложным для российских вузов еще и потому, что они испытывают значительные затруднения в самостоятельной организации внешнеэкономической деятельности (ВЭД). Не секрет, что во времена холодной войны функционирование российской высшей школы, являвшейся монополией государства, было, главным образом, направлено на формирование кадрового и научно-технического потенциала для нужд оборонно-промышленного комплекса. Осуществление ВЭД являлось прерогативой государства. Теперь же вузам предлагается окунуться в мир «непознанного» и «коварного» процесса, предусматривающего массу юридических, политических, экономических и иных нюансов. В этой связи особенно уязвимыми являются технические вузы, у которых большая часть учебных программ и научных разработок включает в себя материалы, имеющие отношение к созданию разного рода вооружения и военной техники. Это автоматически делает их объектом наблюдения со стороны Федеральной службы технического и экспортного контроля Российской Федерации (ФСТЭК), причем с вузов не снимается ответственность за слабое знание всех тонкостей законодательства об экспортном контроле. Так, в ходе плановой проверки службой экспортного контроля России Московского авиационного института было выявлено, что обучение в вузе иностранных студентов по специальности ракетно-космического профиля осуществляется при отсутствии разрешительных документов. Это повлекло за собой наказание по ч. 1 ст. 14.20 КоАП РФ – административный штраф в размере 1 150 000 рублей [9].

Отсутствие реального опыта взаимодействия с ФСТЭК, а также таможенной службой является серьезным препятствием для ВЭД российских вузов на данном этапе, так как несет за собой риски невольной передачи сведений недобросовестным иностранным лицам, заинтересованным в получении определенной информации по реализации военных нужд. Таким образом, для технического вуза, обладающего интеллектуальной собственностью специфического характера, безопаснее вовсе не включаться в ВЭД, дабы не оказаться в сложной ситуации, связанной с передачей запрещенных сведений иностранным партнерам, и не подвергнуться впоследствии административным и уголовным взысканиям.

Тем не менее, именно технические вузы могли бы

стать локомотивом интеграции российской высшей школы в мировое образовательное пространство. Они обладают значительным научно-инновационным потенциалом, накопленным в ходе предшествующего эволюционного развития, позволившего им не только выжить в кризисные 90-е годы прошлого века, но и достаточно динамично развиваться на протяжении последнего десятилетия [10]. Кроме того, одним из наиболее перспективных направлений международного сотрудничества российских технических вузов может стать взаимодействие с вузами стран Содружества Независимых Государств (СНГ). Такое взаимодействие в сфере инженерного образования будет иметь важное геополитическое значение в деле сближения стран бывшего СССР и укрепления позиций России на этих территориях, а также способствовать формированию и развитию общего языкового пространства. Это связано с тем, что в настоящее время в сопредельных государствах особенно остро стоит проблема нехватки инженеров и научных работников в области техники и технологий, поэтому существует потребность в импорте образовательных услуг по техническим направлениям. Российская высшая техническая школа в данном случае имеет определенные преимущества перед западными вузами, обусловленные тем, что Россия еще недавно являлась одной из братских республик этих стран, составлявших единое целое, имевших тесные родственные, культурные, религиозные связи. Кроме того, русский язык, который в свое время был языком культурного и делового общения для стран бывшего СССР, является единственно возможным языком обучения техническим дисциплинам. Руководство ряда республик СНГ уже осознало, что обучение по техническим направлениям принципиально невозможно проводить на национальных языках [11].

Необходимо также отметить, что одна из причин низкой конкурентоспособности отечественных технических вузов заключается в их небольших масштабах и узкой специализации. Многие из российских вузов создавались в свое время под нужды узкоспециализированных предприятий оборонной промышленности, теперь же, после обретения самостоятельности, небольшие размеры и узость специализации мешают таким вузам обрести определенную известность за пределами России, что создает серьезные трудности при выходе на мировой образовательный рынок. Одним из путей решения данной проблемы может стать интеграция российских технических вузов в крупные научно-образовательные комплексы на базе ведущих региональных или российских вузов.

Тенденция к образовательной интеграции постепенно набирает силу в российской высшей школе, поскольку в современных условиях интеграция образовательных учреждений является способом достижения большей устойчивости и эффективности как собственно самой вновь создаваемой интегрированной системы, так и каждого, входящего в нее структурного элемента – участника интеграции, потенциал которого повышается в результате действия интегрирующего эффекта. Так, в 2009 г. Президентом Д. А. Мед-

ведевым был подписан указ о создании пяти федеральных университетов в Северо-Западном, Приволжском, Уральском и Дальневосточном федеральных округах. До этого были созданы Южный федеральный университет на базе Ростовского государственного университета, Сибирский федеральный университет на базе Красноярского государственного университета. Федеральные университеты – это сложные интегрированные структуры, объединяющие на базе ведущего вуза несколько региональных вузов в один научно-образовательный комплекс. «Предполагается, что в течение 5–6 лет высшие учебные заведения новой модели войдут в число 10 ведущих вузов России, а к 2020 году – в число 100 лучших университетов мира» [12].

Помимо федеральных, в РФ создаются также и национальные исследовательские университеты, имеющие особый статус, присваиваемый по результатам конкурсного отбора. Основными критериями при оценке университета на получение статуса национального исследовательского являются: современное состояние и динамика развития университета, его кадровый потенциал, инфраструктура образовательного процесса и научных исследований, эффективность образовательной и научно-инновационной деятельности, свидетельства международного и национального признания, качество, обоснованность и ожидаемая результативность представленной программы [13]. Данный статус присваивается вузам на 10 лет и позволяет получать мощную финансовую поддержку со стороны государства, что должно существенно повысить качество образования и научных исследований, а в целом и конкурентоспособность вузов перед их выходом на мировой образовательный рынок.

В условиях глобализации и рыночной экономики высшее образование трансформируется в одну из наиболее крупных отраслей мировой торговли услугами. Платное обучение иностранных студентов стало стратегическим направлением деятельности университетов всего мира, а объемы поступающих средств от этой деятельности сравнимы с бюджетами вузов. При этом международный рынок образовательных услуг устанавливает в качестве обязательного условия высокий уровень рыночной составляющей в деятельности вузов, а усиливающаяся конкуренция на этом рынке охватывает сильнейшие университеты Америки, Австралии, Великобритании, Франции, Японии и др. [14]. Все это создает определенные трудности для российской ВШ при ее интеграции в мировое образовательное пространство.

Однако выход на международный образовательный рынок в качестве сильного конкурентоспособного игрока должен стать одним из приоритетов в развитии отечественной высшей школы и, более того, сферой национальных интересов для обеспечения безопасности государства в будущем. Это связано с тем, что, с одной стороны, растущий спрос, с другой – усиливающаяся конкуренция приводят к диверсификации образования, а стремление субъектов мирового рынка высшего образования извлекать доходы и ук-

репляться на рынке стимулирует внедрение новых программ, изобретение новых форм и моделей обучения, а главное – появление учебных учреждений нового типа, с яркой инновационной направленностью.

Таким образом, международная конкуренция в сфере высшего образования стимулирует интенсификацию инновационных процессов в странах-экспортерах образовательных услуг, что делает поставщиков этих услуг в лице иностранных университетов полноправными участниками мирового инновационного процесса, в рамках которого они не только выполняют функцию воспроизводства человеческого капитала для интеллектуального сегмента рынка труда, но и непосредственно создают сам интеллектуальный продукт, востребованный инновационной экономикой, силами обучаемых в этих вузах иностранных студентов. То есть налицо мультипликативный эффект от поступающих денежных средств за обучение иностранного студента, его непосредственного участия в интеллектуальных разработках зарубежного вуза, его включенности в социально-экономические связи на территории принимающего государства, заинтересованного в миграции высококвалифицированной рабочей силы, а именно, в приросте человеческого капитала.

Библиографические ссылки

1. Ильинский И. Негосударственные вузы России. Опыт самоидентификации [Электронный ресурс] / Сайт Московского гуманитарного университета. URL: http://www.mosgu.ru/_subdomains/ilinskiy/publications/sod/negosvuz-pre.php#m1.
2. Айдрис И. А. Мировой рынок высшего образования на современном этапе // Альма матер. 2010. № 1. С. 53–61.
3. Education at a Glance. OECD, 2008; Индикаторы образования. 2011: Статистические сборники ВШЭ: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».
4. Галайда О. В. Экономические аспекты зарубежного опыта предоставления образовательных услуг и возможности его использования в Российской Федерации: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.14. Москва, 2008.
5. Воейкова О. Б., Кузнецов А. А. Проблемы интеграции российской высшей школы в международный рынок научно-инновационной продукции и образовательных услуг // Вестник СибГАУ. 2012. № 1(41). С. 170–175.
6. Авдулов А. Н., Кулькин А. М. Системы государственной поддержки научно-технической деятельности в России и США. М.: Изд-во ИНИОН РАН, 2003.
7. Паршина Л. Н. Особенности становления и развития высшей школы Российской Федерации в 1991–1999 гг. (исторический аспект): автореф. дис. ... канд. истор. наук / Росс. ун-т дружбы народов. М., 2008.
8. Колесников А. Н. Треть малых предприятий при вузах существует лишь на бумаге [Электронный ресурс] // Информационно-аналитический ресурс «Наука и технологии России». URL: <http://www.strf.ru>.

9. Головинский Е. А. Международная деятельность вузов с учетом законодательства об экспортном контроле // Матер. семинаров 12–14 декабря 2011 г. Красноярск: СибГАУ, 2011.

10. Воейкова О. Б. Инструменты формирования системы управления инновационной деятельностью в высшей школе : дис. ... канд. экон. наук. Красноярск, 2006.

11. Высшее техническое образование как инструмент политики сближения государств / А. С. Борейшо, К. М. Иванов, А. В. Морозов, Е. И. Степанова / Высшее образование сегодня. 2011. № 9. С. 22–25.

12. Создание новых университетов в федеральных округах [Электронный ресурс]. URL: <http://mon.gov.ru/pro/pnpofed>.

13. Еще 15 вузов стали национальными исследовательскими университетами [Электронный ресурс] / РИА Новости (27 апреля 2010). URL: http://ria.ru/edu_news/20100427/227222236.html.

14. Щербак Е. Н. Мировой рынок высшего образования [Электронный ресурс] // Новый юридический журнал. 2012. № 1. URL: <http://www.new.law-books.ru/index.php?page=1-2012>.

© Воейкова О. Б., 2013

УДК 331.102.312

ИНСТРУМЕНТЫ АНАЛИЗА СТРАТЕГИИ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КАПИТАЛА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

О. В. Гостева

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: ov-gosteva@yandex.ru

Проведен анализ современного состояния наукоемких предприятий, выделены направления развития компетентности на предприятиях ракетно-космической промышленности (РКП), предложена методика оценки экономической эффективности стратегии развития интеллектуального капитала на предприятиях РКП.

Ключевые слова: эффективное использование интеллектуального капитала, предприятия ракетно-космической промышленности, анализ стратегии.

INSTRUMENTS FOR ANALYSIS OF EFFECTIVE USE OF INTELLECTUAL CAPITAL IN THE CONDITIONS OF INNOVATIVE ECONOMY AT THE ENTERPRISES OF THE ROCKET AND SPACE COMPLEX

O. V. Gosteva

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: ov-gosteva@yandex.ru

The author presents the analysis of the current state of science-driven enterprises, defines the ways of development of competence at the enterprises and offers the technique for estimation of economical efficiency of the strategy of intellectual capital development at the enterprises of the rocket and space complex.

Keywords: efficient use of intellectual capital, enterprises of rocket and space complex, strategy analysis.

В современных условиях развития российской экономики инновационная составляющая становится стратегическим ресурсом, обеспечивающим переход экономики на инновационный путь и оказывающим влияние на изменение приоритетов с материального на интеллектуальное производство.

Проведение на рубеже XX–XXI столетий рыночных преобразований в Российской Федерации и принятие связанных с ними нормативных актов, касающихся инновационного продукта, определили изменение структуры капитала организаций различных видов деятельности, которое заключается в неуклонном росте доли нематериальных активов при одновременном снижении доли материальных активов,

преимущественно под влиянием примера развитых западных компаний. Сложившиеся закономерности способствовали повышению роли интеллектуального капитала в формировании и эффективном использовании конкурентных преимуществ предприятия в условиях инновационной экономики.

Как свидетельствует накопленный мировой опыт, интеллектуальный капитал относится к новым, более сложным формам капитала, обладающим большим потенциалом социально-экономической активности, выступающим вектором развития любой экономики. Ему присуща более высокая ступень развития по сравнению с уже известными функциональными формами капитала, что проявляется в устойчивом

уровне инновационного развития тех стран, где активно формируется и используется интеллектуальный капитал, где новые знания и высокие технологии являются основой конкурентоспособности товаров, услуг, фирм, всей экономической системы в целом [1–3].

Изучение проблем формирования интеллектуального капитала становится особенно важным на этапе вступления во Всемирную торговую организацию, которое ведет к обострению конкуренции между национальными экономиками и требует качественно нового подхода к развитию инновационной экономики Российской Федерации, основной характеристикой которого должно стать создание базы управления интеллектуальным капиталом в условиях экономики, основанной на знаниях и базирующейся на высокоэффективных инновационных технологиях. Особую роль в этом играют предприятия РКП.

На сегодняшний день в РФ присутствуют элементы, оказывающие влияние на формирование и развитие интеллектуального капитала. Это, прежде всего, творческие, образованные сотрудники, обладающие интеллектуальным потенциалом и генерирующие знания, способные превратиться в конкурентоспособный продукт, а также имеющийся научно-технический потенциал и материально-техническая база производства инноваций.

Наличие перспективной и конкурентоспособной идеи, эффективной технологии производства продукции или услуг, гибкой и мобильной системы управления, постоянно накапливаемых конкурентных преимуществ обуславливают рыночную ценность интеллектуального капитала и определяют актуальность исследования проблем формирования и эффективного использования интеллектуального капитала предприятия в условиях инновационной экономики.

Как в нормативных актах РФ, так и в публикациях российских авторов чаще всего рассматривается исключительно структура и элементы интеллектуального капитала, но не раскрываются вопросы формирования и эффективного использования интеллектуального капитала в части определения функций управления, идентификации факторов воспроизводства интеллектуального капитала и оценки его влияния на формирование и использование конкурентных преимуществ соответствующих социально-экономических систем. В научных исследованиях не выявлены направления формирования организационной среды для воспроизводства интеллектуального капитала, не сформирована система управления интеллектуальным капиталом, соответствующая современным тенденциям инновационного развития экономики.

Решение проблемы совершенствования управления интеллектуальным капиталом малоэффективно без разработки общего методологического подхода к управлению интеллектуальным капиталом в современных условиях хозяйствования. Таким образом, необходима концепция формирования и эффективного использования интеллектуального капитала предприятия, практическая реализация которой позволит повысить качество управления им как стратегическим ресурсом экономики.

Ключевыми характеристиками инновационной экономики являются ведущая роль интеллектуального капитала как приоритетного производственного ресурса, превращение фундаментальной науки и знания в непосредственную производительную силу, внедрение интеллектуального капитала во все сферы социально-экономической жизни.

Как свидетельствуют результаты проведенного исследования, перспективы использования интеллектуального капитала связываются с психологическими характеристиками человека, его эмоциями. Поэтому особую важность приобретает такая функция управления интеллектуальным капиталом, как скоординированное регулирование эмоционального потенциала. Эмоциональный капитал, накопленный человеком или группой лиц, обладает всеми признаками положительного побочного эффекта. Его регулирование двойственно: с одной стороны, происходит регулирование внеценовых явлений, с другой – внеправовых. Эти две стороны социально-экономического регулирования не противоречат друг другу, так как материально-вещественный мир определяется ценовыми взаимоотношениями в рыночных условиях. Регулирование эмоционального потенциала имеет специфические черты и особенности, определенные методы регулирования на микро- и макроэкономическом уровнях. С учетом вышеперечисленных характеристик можно сделать вывод, что перспективные направления развития интеллектуального капитала связаны с интеллектуальными и эмоциональными особенностями человека, который является главным стратегическим ресурсом развития в условиях инновационной экономики.

Так, основная цель предприятия ОПК – это создание новой и усовершенствованной высокотехнологичной продукции. Для этих предприятий критериями эффективности и успеха являются показатели, связанные с количеством новых разработок, ноу-хау, освоенных новых технологий, отдача от НИОКР и т. д. В общем от результатов выпущенной продукции. Критерии в виде оценок стоимости предприятия с применением величины рыночной стоимости предприятия в расчетах не имеют места в силу оборонной специфики. Конечно, чтобы анализировать интеллектуальный капитал, необходимо разбить его на части. Так, вполне возможно использовать для целей анализа матрицу Свейби, несколько модифицировав ее под специфику предприятия ОПК. Составляя такие матрицы за ряд временных периодов, по динамике описываемых показателей можно сделать некоторые выводы о состоянии интеллектуального капитала.

Согласно оценке самих организаций, оценивших отдельные результаты инновационной деятельности как основные, получается, что наиболее востребованный результат – расширение ассортимента. Далее чуть отстают улучшение качества и соответствие современным техническим регламентам и стандартам. Затем несколько менее востребованы расширение рынков сбыта и рост производственных мощностей, еще меньше – повышение гибкости производства, и далее – сокращение материальных и энергозатрат, сокращение затрат на оплату труда.

Расширение ассортимента предполагает диверсификацию производства, что позволит повысить устойчивость деятельности предприятий и минимизировать риски. Под улучшением качества следует понимать получение конкурентных преимуществ за счет высококачественного продукта. А вот наименьшая востребованность повышения гибкости производства, сокращения энергозатрат слабо согласуется с целями инновационной деятельности. Так, без высокой гибкости производства не удастся быстро переходить на выпуск новой продукции. Без повышения энергоэффективности отечественная инновационная деятельность не будет иметь стратегических перспектив.

Значительная часть предприятий отечественных высокотехнологических отраслей имеет свои характеристики состояния интеллектуального капитала (табл. 1).

В результате анализа статистических данных предприятий отечественных высокотехнологических отраслей, можно заключить, что отставание данных отраслей от мировых лидеров выражается в малой доле вновь внедренной продукции, что может являться следствием малых вложений в разработки. Предприятиям не хватает собственных средств для осуществления технологических инноваций. Весомым препятствием является высокая стоимость нововведений. В этой связи надо упомянуть, что мала доля организаций, получающих поддержку из федерального бюджета, так как возможно условия жестки или поддержка недостаточна, к тому же высока неопределенность экономической выгоды. Таким образом, необходимо развивать всю цепь использования интеллектуального капитала предприятий – от исследований и разработок до массовых продуктов. Как показывает анализ, на последних звеньях этой цепи ситуация хуже, чем на первых. Конечно, для получения наивысшей отдачи необходимо решать весь комплекс задач. Слабое звено – передача результатов исследований и разработок в массовое производство. Большие затраты и значительный риск вложений в производство продукции на основе разработок является сдерживающим фактором инновационного развития. Отсутствие результата на выходе цепи негативно воздействует на всю ее работу. Так, безрезультатно функционируют начальные звенья, а именно, использование интеллектуального капитала для создания промышленных образцов, полезных моделей и т. д. Получается, что для развития интеллектуального капитала высокотехнологических отраслей необходимо снизить стоимость нововведений, снизить стоимость реализа-

ции интеллектуальных продуктов и интеллектуального капитала в массовых продуктах либо уменьшить риски нововведения, чему призваны помогать государственные программы развития (как увеличение прямого финансирования, так и развитие других инструментов) источников средств. Решением первого вопроса вполне может быть увеличение отдачи интеллектуального труда, но опять же на основе его использования для производства массовой продукции, т. е. от работы всей рассматриваемой цепи использования интеллектуального капитала предприятий [4]. Позитивным моментом является то, что множество разработок создается собственными силами, т.е. есть потенциал для развития, однако его необходимо развивать и эффективно использовать.

Оценка интеллектуального капитала предприятия РКП должна быть подчинена цели выпуска новой продукции, для чего необходимо измерение по показателям инноваций и роста, эффективности, удовлетворенности клиентов, которые дают первичную информацию о данной области деятельности на предприятии. Поэтому такие показатели скорее выражены в натуральных величинах (количество разработок, средний возраст патентов и т. д.), которые объективно отражают достижение цели предприятия РКП.

Подводя итог, надо сказать, что предприятия РКП нацелены на создание новой продукции, а для управления деятельностью такого предприятия необходимы технологии анализа и оценки интеллектуального капитала. Показатели анализа и измерения интеллектуального капитала для предприятий РКП должны быть ориентированы не на стоимость предприятия, а на способность создавать новую высокотехнологическую продукцию. В связи с этим они должны отражать новизну, креативность, знания (табл. 2).

На основании предложенных направлений разработан методика оценки стратегии развития интеллектуального капитала предприятия РКП (см. рисунок).

Во-первых, постановка цели предприятия РКП. Предприятию для выживания в современных условиях необходимо своевременно реагировать на изменения во внешней среде, и в соответствии с ними выстраивать свою деятельность путем постановки целей и разработки стратегии предприятия по достижению этих целей. Для предприятия РКП значительно отставание от иностранных предприятий по показателям вновь внедренной продукции. Таким образом, наиболее актуальной целью является ликвидация отставания предприятия РКП от иностранных организаций.

Таблица 1

Современное состояние интеллектуального капитала на наукоемких предприятиях

Сильные стороны	Слабые стороны
Большая часть производительных интеллектуальных активов создается собственными силами (более половины разработок создается собственными силами). Интеллектуальный капитал больше воплощается в продуктах, чем в процессах (продуктовых инноваций больше, чем процессных)	Недостаток собственных средств для инвестиций в интеллектуальный капитал на полный цикл (недостаток собственных средств на технологические инновации). Высокая сложность окупаемости вложений в интеллектуальный капитал (высокий экономический риск нововведений и сложность цикла интеллектуального капитала). Низкий уровень использования интеллектуального капитала организациями (малая доля вновь внедренной продукции)

Направления развития интеллектуального капитала для предприятий РКП

Направления развития интеллектуального капитала	Главный результат деятельности предприятия	Назначение и связь критерия с результатом деятельности предприятия
Инновационность	Улучшение характеристик и свойств продукции (новизна, надежность, ресурсосберегаемость и т. д.)	Отражает новые свойства продукции, экономию ресурсов
Креативность		Отражает динамику обновлений, способность к генерации нововведений
Знания		Отражает исходную базу для нововведений (косвенно)
Эффективность		Отражает производительность предприятия, удовлетворенность клиентов
Стабильность		Отражает постоянство человеческих ресурсов и отношений с заказчиками

Во-вторых, разработка функциональной стратегии предприятия. Для достижения поставленной цели необходимо сформировать комплекс действий по всем подсистемам предприятия. Предприятие ракетно-космической промышленности состоит из нескольких подсистем, таких как основное производство, вспомогательное производство, маркетинг, финансы и т. д. Так, опытно-конструкторским разработкам необходимо интенсифицировать создание собственных разработок, серийному производству – увеличить долю вновь внедренной продукции, вспомогательному производству – обеспечить соответствие вспомогательного производства новой продукции, маркетингу – снизить экономический риск нововведений путем наиболее точного реагирования на потребности. Надо сказать, что интеллектуальный капитал предприятия представлен во всех подсистемах предприятия. Однако наиболее значим для предприятия РКП интеллектуальный капитал, создаваемый в основном производстве, а именно в опытно-конструкторских разработках, потому что переход от результатов научных исследований к практическому их применению в виде новых продуктов происходит на наукоемких предприятиях, которым является предприятие РКП. Поэтому необходимо развитие интеллектуального капитала в разработках и проектировании.

В-третьих, развитие интеллектуального капитала в проектировании и конструировании. Область опытно-конструкторских разработок работает в связи с другими процессами, во многом концентрирует все условия других внутренних подсистем предприятия и использует результаты внешних для предприятия систем, таких как научные исследования, для создания нового продукта. Так, необходимо учитывать тенденции в развитии материалов и технологий; при создании нового продукта необходимы другие характеристики механизмов, навыки и знания работников и т. д. Так как наукоемкое предприятие применяет достижения научных исследований в производстве продуктов, то очевидно значение этих внешних исследований для предприятия. Надо учитывать помимо российских исследований и иностранные достижения, чтобы соответствовать мировому уровню. Поэтому развитие интеллектуального капитала в проектировании и кон-

струировании предприятия РКП должно происходить совместно и во взаимном влиянии с обозначенными системами, как внутренними, так и внешними для предприятия РКП.

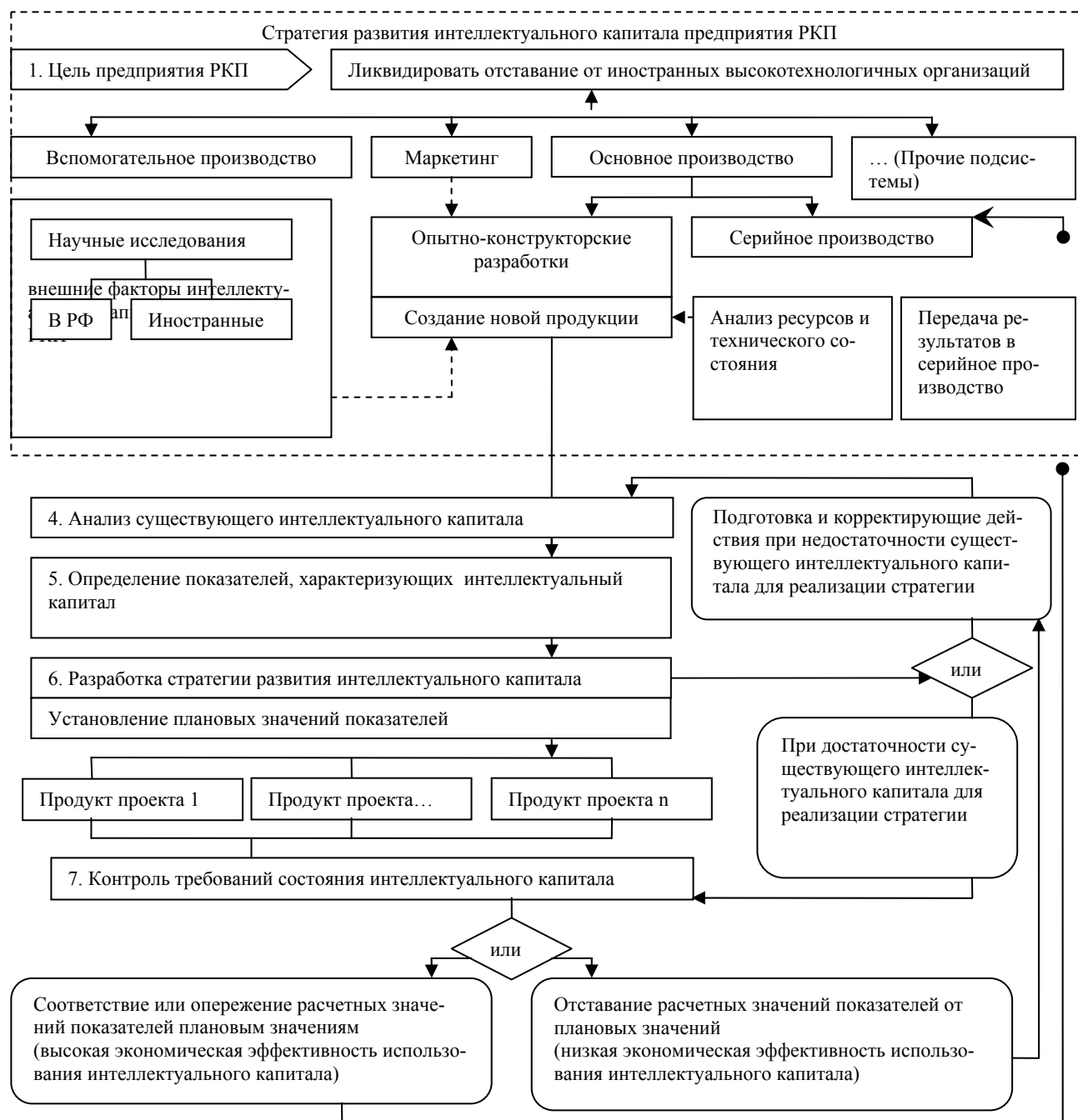
В-четвертых, анализ существующего интеллектуального капитала на предприятии. Его необходимо провести, чтобы выявить, в каком состоянии находятся его элементы, и в дальнейшем использовать эти данные для измерения того, насколько они соответствуют разрабатываемой стратегии, какие из них развить, в каком направлении и в каком размере.

В-пятых, определение показателей, характеризующих интеллектуальный капитал предприятия. Необходимо так же определить показатели, характеризующие интеллектуальный капитал предприятия, так как для управления интеллектуальным капиталом надо его измерять. Измерение позволяет сравнивать и оценивать соответствие интеллектуального капитала поставленным целям.

В-шестых, разработка стратегии развития интеллектуального капитала. Она предполагает выработку комплекса действий, выполнение которого позволит достичь поставленной цели предприятия в подсистеме проектирования и конструирования, а именно, создать продукцию, применяя передовые достижения науки и техники.

Комплекс этих изменений обобщенно и представляет стратегию. Изменения в интеллектуальном капитале не будут в полной мере эффективны без изменений в других элементах деятельности, также без совместных изменений не будет синергетического эффекта, поэтому стратегию развития интеллектуального капитала предприятия РКП имеет смысл рассматривать совместно с мероприятиями по изменению процессов, механизмов, используемых ресурсов и т. д. Отметим так же, что деятельность по созданию нового продукта осуществляется в ходе осуществления проекта.

На этапе разработки стратегии развития интеллектуального капитала устанавливаются плановые значения показателей, рассмотренных на предыдущем этапе, которые необходимо достичь для выполнения стратегии и развития интеллектуального капитала.



Этапы методики оценки экономической эффективности стратегии развития интеллектуального капитала предприятия РКП

В-седьмых, контроль требований состояния интеллектуального капитала. Так, по завершении проекта необходимо измерить использование интеллектуального капитала для создания и выпуска нового продукта по рассмотренным ранее показателям. При несоответствии фактических значений показателей плановым необходимо предпринять корректирующие действия. Необходимо выявить, при каких условиях произошло недостижение нужных значений показателей и в соответствии с этими условиями принять рекомендации по воздействию на элементы

интеллектуального капитала и его развитию. При соответствии стратегии продолжается ее реализации. По завершении следует разработка новой стратегии. Результатом деятельности проектирования и конструирования является продукт проекта. Далее необходима его передача в серийное производство и решение задачи увеличения вновь внедренной продукции. Здесь же происходит получение прибыли за счет выпуска и реализации серийного продукта, и в этом заключено дальнейшее использование интеллектуального капитала.

Поскольку разработка продуктов ведется по проектам, то и контроль требований состояния интеллектуального капитала необходимо осуществлять по проектам, а также по предприятию в целом для оптимального сочетания проектов по стадиям реализации. Надо сказать, что по мере продвижения проекта к завершению происходит и развитие интеллектуального капитала предприятия РКП: развиваются знания работников, базы данных, ноу-хау, торговая марка. В реальности необходимо создавать условия для получения качественных баз данных.

Отслеживание показателей, представленных в блоке 4 (см. рисунок), позволяет анализировать обновляемость продукта, долю сотрудников и подразделений, занятых разработками, долю затрат на разработки. Сопоставляя эти данные с данными о востребованности создаваемого продукта, а также с данными о том, превосходит или отстает эта продукция от аналогов, можно заключить об эффективном или неэффективном использовании интеллектуального капитала предприятия РКП.

Таким образом, производится анализ и оценка интеллектуального капитала по креативности и эффек-

тивности. Данные показатели характеризуют, главным образом, работу по обновлению продукта. Это хорошо соотносится с актуальной целью предприятия РКП о преодолении отставания от иностранных организаций путем активизации создания новой продукции.

Библиографические ссылки

1. Лукичева Л. И., Егорычев Д. Н. Внутрифирменное управление интеллектуальными активами. М. : ООО «Омега-Л», 2011.
2. Лукичева Л. И., Салихов М. Р. Подходы к оценке стоимости интеллектуального капитала организаций // Менеджмент в России и за рубежом. 2011. № 4.
3. Селезнев Е. Н. Интеллектуальный капитал как объект управления // Справочник экономиста. 2010. № 2.
4. Литун О. Н. Моисеенко С. С. Интеллектуально-креативные ресурсы как основа наукоемкой экономики // Оборонный заказ : Интернет-приложение [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ozakaz.ru/index.php>.

© Гостева О. В., 2013

УДК 657.6

МЕТОД УЧЕТА ЗАТРАТ В ИННОВАЦИОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Г. И. Золотарева, И. В. Федоренко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: astra07@inbox.ru

Рассматривается авторский метод учета производственных затрат, разработанный для предприятий, осуществляющих инновационную деятельность.

Ключевые слова: метод учета, производственные затраты, затраты.

COST ACCOUNTING METHOD IN INNOVATIVE ENTERPRISES OF ROCKET AND SPACE INDUSTRY

G. I. Zolotareva, I. V. Fedorenko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: astra07@inbox.ru

The article describes an original production cost accounting method developed for enterprises performing innovative activity.

Keywords: cost accounting method, production costs.

Производство высокотехнологичной инновационной продукции предполагает осуществление серьезных прикладных (а иногда и глубоких фундаментальных) научно-технических исследований в разных областях: от свойств и качества используемого сырья, материалов и оборудования до технологии его производства. Чем длиннее производственный цикл изготовления инновационной продукции, тем сложнее предусмотреть все возможные детали реализации за-

думанной идеи. Зачастую на таких предприятиях научно-технические исследования продолжают параллельно, позволяя в случае необходимости изменять технологический процесс. Однако при всей привлекательности такой ситуации с точки зрения развития научно-технического прогресса, производство инновационной продукции продолжает оставаться весьма затратным, что приводит к неопределенности с точки зрения возможности получения прибыли. Если

речь идет об уникальной продукции, не имеющей аналогов, то получение повторного аналогичного заказа, а значит возможность использования оставшихся материальных запасов, уникального оборудования, обученного персонала, весьма проблематично. Хотя технологии изготовления отдельных приборов, узлов, деталей и материалов могут и должны быть использованы, возможности такого использования определить заранее весьма проблематично. В таких условиях требования к информативности учетных данных за выполнением запланированных параметров производства ужесточаются исходя из необходимости получения точной и оперативной информации о величине производственных затрат одновременно в нескольких разрезах.

В процессе проведенных исследований были установлены следующие обстоятельства:

1. Жизненный цикл любого изделия состоит из определенных общих этапов (стадий, фаз, периодов), имеющих, однако, разные временные параметры.

Для каждого этапа жизненного цикла инновационной продукции характерны типичные виды затрат, причем существует последовательность их возникновения (на рис. 1) [1]. Это позволяет выделить временные рамки – этапы жизненного цикла – в качестве сегментов контроля затрат на осуществление основных хозяйственных операций, а также показатели, которые необходимо контролировать на этих стадиях.

Например, этап «Формулирование идеи, проведение научно-технических исследований» характеризуется существенными финансовыми затратами на приобретение специализированного оборудования для проведения исследования, образцов материалов, оплату работы высокопрофессиональных специалистов. Результаты исследований могут завершиться как разработкой нового продукта (материала, технологии и т. п., включая приобретение патента), так и отсутствием необходимого результата. В то же время происходит накопление научно-технического потенциала в виде приобретения определенных навыков специалистами, увеличения количества высокотехнологичного оборудования. Объемы производства и продаж на этой стадии отсутствуют. Основными контролируемыми показателями на данном этапе являются затраты на НИОКР в целом и затраты на оплату труда, приобретение специализированного оборудования в частности.

На этапе «Конструкторская разработка изделия, технологии производства, подготовка опытного образца» идея и принцип работы и производства нового изделия уже определены, идет разработка технической документации и технологии изготовления продукции. На данном этапе основное внимание следует уделять контролю затрат на оплату труда.

Наиболее сложными в плане количества и разнообразия контролируемых показателей являются этапы «Приобретение необходимого оборудования, материальных ресурсов» и «Производство, проверка качественных и технических характеристик». Здесь наиболее важными показателями являются затраты на приобретение основных средств, амортизация, затраты на аренду, капитальный и текущий ремонт, расчеты с контрагентами, оценка незавершенного производства,

затраты на оплату труда, налоговые платежи и другие показатели. Дополнительно на данных этапах следует уделять внимание показателям платежеспособности и финансовой устойчивости. Если же они не стабилизировались, то это означает, что предприятие не добилось того уровня эффективного функционирования, который соответствует данному этапу. На данной стадии развития важными становятся показатели оборачиваемости и рентабельности продаж. Чем выше эти показатели, тем лучше идут дела у предприятия. Уменьшение одного из коэффициентов должно анализироваться с целью своевременного принятия соответствующих мер по оздоровлению предприятия. Оборотный капитал обеспечивает непрерывность процесса производства, и, соответственно, его анализ имеет значение для оценки эффективности функционирования предприятия.

На завершающих производство этапах «Упаковка, хранение, реализация, транспортировка», «Подготовка к эксплуатации, эксплуатация, техническое обслуживание» основное внимание следует уделять материальным затратам, транспортным расходам, затратам на оплату труда, расчетам с контрагентами. Этап «Утилизация и переработка» завершает жизненный цикл продукта, ожидаемые затраты на данном этапе связаны с оплатой труда, материальными затратами и утилизацией изделия.

2. Технологический процесс по производству инновационной продукции зависит от решения конкретных конструкторских задач и получения нужных характеристик и включает в каждом конкретном случае разное количество операций; меняется и последовательность их выполнения. Каждое вновь производимое изделие может иметь уникальный набор данных операций. По существу производство делится на ряд технологических операций, последовательность выполнения которых известна уже на стадии составления технической документации. Параметры многих технологических операций могут быть заранее определены в виде сроков их выполнения, количества потребленных материальных и трудовых ресурсов, машино-часов используемого оборудования и подготовки изделия к следующей операции, что позволяет просчитать календарные графики всего технологического процесса, сроки его завершения и затраты каждого периода. Однако при производстве определенных изделий (например, космических аппаратов, военной техники и др.) в силу особенностей режима эксплуатации их качеству уделяется особое внимание. В течение всего периода изготовления отдельные детали и узлы изделия, а также само изделие в конце производства проходят различные испытания, имитирующие как условия эксплуатации, так и условия транспортировки и доставки. В ходе испытаний возможно внесение конструкторских изменений (даже принципиальных) отдельных узлов и деталей. В результате надежность изделия повышается, но себестоимость может сильно измениться (рис. 2). Кроме того, особое значение при производстве играют сроки выполнения работ, в результате чего на заключительном этапе может резко измениться стоимость используемых ресурсов (чаще всего трудовых).



Рис. 1. Система контролируемых показателей по стадиям жизненного цикла

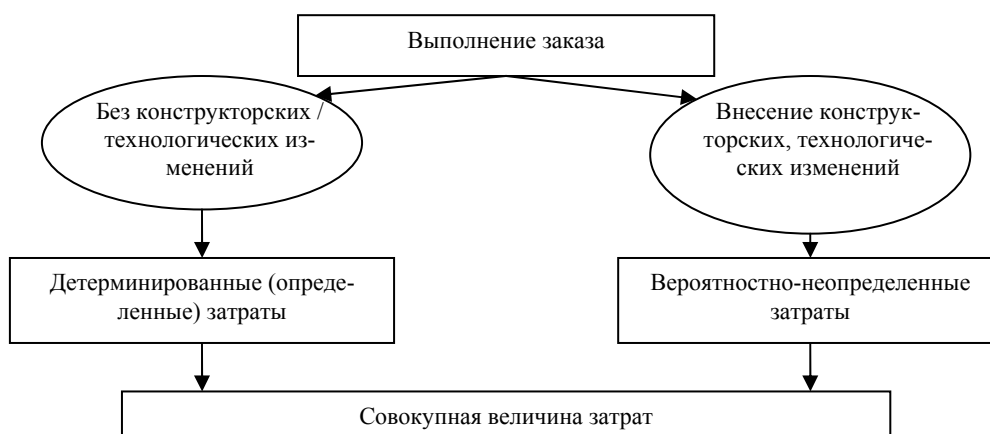


Рис. 2. Характеристика затрат в зависимости от наличия изменений при выполнении заказа

Таким образом, при любом изменении процедуры изготовления будущего изделия в результате каких-либо обстоятельств (новые технические параметры для изделия в целом или его отдельных конструктивных узлов, использование иных материалов в процессе производства или других конструкторских решений, применение новых технологий и т. п.) информация о затратах переходит из разряда детерминированной (определенной) в разряд вероятностно-неопределенной. Этот факт требует применения иных подходов к их планированию и контролю.

Предлагаемая декомпозиция затрат по степени неопределенности позволит разделить их на планируемые и ожидаемые, выделить показатели, которые нуждаются в постоянном контроле.

3. Позаказный метод учета затрат, который традиционно используется при выполнении такого типа работ, является простым, но недостаточно информативным способом: его использование далеко не всегда

позволяет определить, какая прибыль ожидает предприятие по завершению работ.

Одновременное использование позаказного и нормативного методов учета [1–3] позволяет улучшить ситуацию в плане информативности, но затруднено при длительном производственном цикле и большом объеме работ при производстве высокотехнологичной инновационной продукции, поскольку уникальность производимых изделий, широкий спектр номенклатуры и операций, выполняемых на рабочих местах, являются источником нестабильности производственных условий, ограниченности нормативной базы расхода материальных и трудовых ресурсов, а значит возможных ошибок при планировании и контроле себестоимости производимой продукции.

Сложность группировки затрат при данном разделении заключается в невозможности выделения повторных затрат при повторении процедуры в результате необходимости достижения определенных за-

данных технических характеристик деталей сборочных единиц, отдельных узлов или изделия в целом.

Кроме того, при производстве отдельных видов инновационной продукции (например, космических аппаратов) затраты по некоторым традиционным процессам (приобретение необходимого оборудования, комплектующих, приборов, деталей и других материальных ценностей) осуществляются отнюдь не традиционным способом. При их приобретении следует принимать во внимание жестко установленные технические характеристики. Причем, поступление приборов, комплектующих, оборудования, коммерческой нагрузки должно быть обеспечено в полном объеме на стадии разработки технической документации, т. е. еще до начала изготовления опытного образца и задолго до того, как они будут востребованы. А это означает необходимость содержания складских помещений, имеющих, к тому же, соответствующие условия для их хранения. Все детали, комплектующие, включая коммерческую нагрузку, должны быть заранее исследованы на предмет необходимых характеристик и совместимости с другими деталями, комплектующими, приборами, что достигается путем проведения дополнительных, достаточно длительных процедур исследования.

Это означает, что на этапе приобретения материальных ресурсов будут иметь место «неэкономные» затраты: полученные про запас детали, комплектующие могут быть никогда не востребованы в дальнейшем; экономия на стоимости поставок за счет выбора поставщиков, маршрутов доставки практически невозможна, так как определяющим фактором при заключении договора на поставки будет не соотношение цены, качества и возможных транспортных затрат, а требуемые технические характеристики. Здесь важно исключить непредусмотренные затраты: штрафы за простой вагонов, транспорта, недооформленные документы, отсутствие технической документации, описаний и т. п.

В процессе проведенных исследований для предприятий космической отрасли, осуществляющих инновационную деятельность, был разработан авторский метод учета затрат на производство уникальных (либо выпускаемых небольшими сериями) машин и оборудования, в основе которого лежит применение двойной оценки величины затрат, а также сочетание элементов сметного планирования, позаказного, по-процессного и нормативного методов учета затрат и рекомендуемой для таких производств классификации затрат (матрицы затрат).

В существующей практике хозяйственной деятельности на основании сметы, наличие которой было обязательным условием и законным основанием для планирования и оплаты выполненных работ, работали строительные организации, бюджетные учреждения (до перехода на финансирование по государственному заказу). Принцип сметного планирования отчасти лежит в основании бюджетирования, осуществляемого с целью обеспечения производственно-коммерческого процесса необходимыми денежными ресурсами.

Наличие технической документации на производимую продукцию (работы, услуги) обеспечивает

возможность расчета установленного укрупненного перечня контролируемых показателей (сметы заказа), который в дальнейшем детализируется по каждому отдельному узлу будущего изделия.

В процессе проведенного исследования с учетом выделенных особенностей инновационной деятельности предприятий был определен перечень необходимых показателей, разработана методика расчета, учета и контроля данных показателей и дальнейшей работы с этими показателями.

В качестве наиболее важных укрупненных показателей для расчета определены: общая стоимость заказа, стоимость трудовых и материальных ресурсов, стоимость оборудования, амортизации, стоимость НИОКР, прочие и накладные расходы. Каждый из показателей предлагается разделить на следующие составляющие:

- стоимость трудовых ресурсов (фонд заработной платы): стоимость трудовых ресурсов по категориям работников (ведущие конструкторы, инженерно-технический персонал и вспомогательный персонал) при регламентируемых работах и премиальный фонд;

- стоимость материальных ресурсов: общая регламентируемая стоимость материально-производственных запасов, стоимость отдельных контролируемых видов ресурсов (по видам) и прочие ресурсы, вероятно-неопределенные затраты на дополнительные ресурсы;

- стоимость оборудования (по видам) и планируемой амортизации: стоимость ранее приобретенного оборудования, планируемое к приобретению оборудование (приобретаемое только на этот заказ, приобретаемое на длительный срок для использования при выполнении этого и последующих заказов, приобретаемое для общехозяйственных нужд) и вероятно-неопределенные затраты на дополнительное оборудование, не предусмотренное первоначально утвержденной документацией; аналогичное разделение следует провести в отношении начисляемой амортизации по оборудованию, используемому при изготовлении конкретного вида инновационной продукции и других видов продукции;

- стоимость НИОКР: стоимость ранее выполненных НИОКР, результаты которых будут использоваться в текущем заказе; стоимость НИОКР, выполняемых в рамках текущего заказа; НИОКР, выполняемых в рамках текущего заказа, но для использования при выполнении этого и последующих заказов; вероятно-неопределенные затраты на первоначально не предусмотренные НИОКР;

- прочие и накладные расходы рекомендуется также подразделить на затраты, осуществляемые в рамках утвержденной технологической документации, и вероятно-неопределенные затраты;

- общая стоимость заказа: общие затраты на выполнение заказа, планируемая прибыль, вероятно-неопределенные затраты на дополнительные ресурсы.

Данные показатели формируются в матрицу затрат, расчет планируемых показателей которой, а затем и контроль их исполнения рекомендуется произ-

водить в двух оценках: учетной (номинальной) и экономической. Это позволит обеспечить, с одной стороны, мониторинг потребности предприятия в трудовых, материальных, финансовых ресурсах на протяжении выполнения всего заказа, с другой стороны, контроль планируемых финансовых результатов и требуемую точность учетного процесса, а также составление финансовой отчетности.

При экономической оценке трудовых ресурсов следует принимать во внимание важность выделения в отдельный контролируемый показатель экономическую стоимость труда ведущих конструкторов и высокопрофессионального инженерно-технического персонала, так как он во многом зависит от их возможного участия в выполнении альтернативных и параллельных заказов и их вынужденная замена повлечет за собой существенные незапланированные расходы.

При расчете экономической оценки приобретаемого оборудования и производимых НИОКР следует принимать во внимание возможность их дальнейшего использования при выполнении последующих или параллельных заказов.

Выделение в показателях стоимости материальных ресурсов, оборудования и амортизации отдельной категории вероятностно-неопределенных затрат позволяет запланировать возможное отклонение от первоначальной технологии производства инновационной продукции.

Для определения экономической оценки отдельных видов материальных ресурсов следует принимать во внимание возможную инфляцию, необходимость проведения дополнительных испытаний, наличие альтернативных издержек, а также их ценность, полезность и потребительную стоимость.

Учетная стоимость ресурсов формируется на основании первичных документов в строгом соответствии с существующими правилами учета и калькули-

рования, действующими на нормативном уровне и закрепленными в учетной политике.

Применение разработанного метода предполагает следующую схему учета и контроля затрат (рис. 3).

1. Разработка технических параметров, технологии и планирование производства инновационной продукции.

2. Обоснование потребности в финансовых, трудовых и материальных ресурсах, необходимом оборудовании (определение экономической оценки).

3. Расчет установленного укрупненного перечня контролируемых показателей (матрицы затрат) с дальнейшей детализацией по каждому отдельному узлу будущего изделия (определение учетной стоимости ресурсов и иных показателей).

4. Учет затрат по статьям калькуляции матрицы затрат; при этом анализу и контролю подлежит появление и накопление вероятностно-неопределенных затрат.

5. Учет отклонений фактических показателей от запланированных с учетом их классификации и видов оценки.

6. Мониторинг и анализ возможных отклонений, выявление причин отклонений.

7. Корректировка плана производства продукции либо использование ресурсосберегающих технологий.

Использование предлагаемого метода позволяет обеспечить требуемую точность учета и повысить его информативность, оперативно выявить причины отклонений и принять своевременные управленческие решения для исправления ситуации, а также учесть особенности производственной деятельности инновационных предприятий космической отрасли. Использование в дальнейшем различных видов анализа выявленных отклонений (например АВС-анализа) позволит определить направление наиболее срочных управленческих решений.



Рис. 3. Основные этапы предлагаемого метода учета и контроля затрат

Библиографические ссылки

1. Федоренко И. В., Золотарева Г. И. Развитие методологии учета и аудита затрат / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009.
2. Золотарева Г. И., Федоренко И. В. Особенности учета, контроля и аудита затрат на предприятиях по производству космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию СибГАУ имени академика М. Ф. Решетнева (10–12 ноября 2009, г. Красноярск) : в 2 ч. ; под. общ. ред. Ю. Ю. Логинова / СибГАУ. Красноярск, 2009. Ч. 2. С. 618–620.

3. Золотарева Г. И., Васильева С. В. Проблемы организации учета затрат на предприятиях машиностроения // Учет, анализ и аудит: проблемы теории и практики : сб. науч. тр. / под. общ. ред. Г. И. Золотаревой ; СибГАУ. Красноярск, 2011. Вып. 6. С. 71–74.

© Золотарева Г. И., Федоренко И. В., 2013

УДК 350.5(450+571)(07)

МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И НАУЧНАЯ КОНЦЕПЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ РОССИИ

Т. С. Попова

Воронежский государственный университет инженерных технологий
Россия, Воронеж, пр. Революции, 19. E-mail: popovatatser@yandex.ru

Показано, что экономика России особенно остро ощущает необходимость в повышении доли современной конкурентоспособной продукции в годовом продукте, проведении для этого изменений в отраслях, производящих эту продукцию путем замены основных фондов, вовлечения в отрасли народного хозяйства новых кадров, имеющих высокие управленческие профессиональные компетенции, и др. В связи с этим особую практическую значимость приобретает научный поиск новых подходов к формированию концептуальных основ управления преобразованиями национальной экономической системы, нацеленных на инновационные преобразования сложившейся в предыдущий период структуры народного хозяйства и воспроизводственных пропорций экономики страны.

Новые варианты управления развитием требуют разработки новой методологии и инструментальных средств решения актуальной проблемы.

Ключевые слова: национальная экономическая система, реформирование национальной экономики, ресурсное обеспечение преобразований, стратегические аспекты повышения конкурентоспособности.

THE METHODOLOGY OF MANAGERIAL EFFECT AND THE SCIENTIFIC CONCEPT OF REFORMS IN THE NATIONAL ECONOMY OF RUSSIA

T. S. Popova

Voronezh State University of Engineering Technologies
19 Revolution prospect, Voronezh, Russia. E-mail: popovatatser@yandex.ru

The paper shows that Russian economy has particularly acute need to increase the share of advanced competitive products in the annual product and to make changes in the industries producing these products by replacing the fixed assets involved in the sector of the economy, involving highly professional management, etc. In this regard, practically important becomes scientific search for new approaches to the conceptual basis of management of reforms in the national economic system, aimed at innovative transformations of the economical structure developed in the previous period and the reproduction ratios of the national economy. The author offers new variants of the management of reforms require development of new methodologies and instruments for solving actual problems.

Keywords: national economic system, reforms in the national economy, resource support of the reforms, strategic aspects of competitive recovery.

На современном этапе преобразований национальной экономики Россия продолжает решать задачи становления национальной модели и стоит перед необходимостью дальнейшего углубления рыночных реформ путем формирования и реализации соответствующих современному периоду развития концепту-

альных основ управления структурными преобразованиями экономической системы страны. Назрела необходимость осуществления преобразований, ориентированных на достижение конкурентных преимуществ, экономический рост, социальную устойчивость общества [1]. При этом предполагается развитие

всех элементов преобразований: 1) либерализация; 2) структурные и институциональные реформы; 3) преобразование структуры народного хозяйства; 4) устранение отрицательных деформаций первого этапа переходной экономики, связанного с приватизацией и другие мероприятия.

Ключевая задача состоит в изменении характера преобразований и системы управления ими, в реальном осуществлении мер по укреплению экономического положения России в рейтинге ее конкурентоспособности во внутреннем и международном аспектах [1; 2].

Важной особенностью современного этапа являются изменившиеся условия развития экономики связи с устойчивым и быстрым ростом цен на энергоносители, что создает ресурсное обеспечение преобразований и вместе с тем требует особых мер макроэкономической политики, направленных на нивелирование последствий значительного поступления денежной массы в экономику России.

Результатами корректировок в системе традиционного управления экономикой страны являются следующие. На период 2008–2009 гг. федеральный бюджет сводился с профицитом. Сформировался большой Стабилизационный фонд, объем которого к 2008 г. превысил 3,8 трлн руб. Значительно выросли международные валютные резервы, которые в первом квартале 2008 г. составили свыше 490 млрд долл. США

Доходы федерального бюджета во втором квартале 2010 г. сложились в сумме 2618,3 млрд руб., или 19,9 % ВВП. По сравнению с 2009 г. поступления в федеральный бюджет увеличились на 17,9 %, что с поправкой на темпы инфляции означает рост на 11,2 %. Объем доходов федерального бюджета по итогам первых четырех месяцев года составил 37,7 % от прогнозируемого объема, утвержденного Законом «О федеральном бюджете на 2010 г. и на плановый период 2011 и 2012 гг.», поступление нефтегазовых доходов в федеральный бюджет за этот период составило 1149,4 млрд руб. Нефтегазовые доходы по итогам первого квартала 2010 г. составили 43,9 % от всех полученных доходов. Расходы федерального бюджета на этот период – 3030,5 млрд руб. или 23,0 % ВВП. По сравнению с 2009 г. они увеличились на 17,8 %, что в реальном исчислении означает их рост на 11,1 %. Они были профинансированы на 30,6 % от утвержденных бюджетных назначений на 2010 г. [3]. Из изложенного выше видно, что предпринятые управленческие воздействия на экономические показатели страны обеспечили благоприятные условия для роста основных макроэкономических показателей и осуществления дальнейших преобразований экономической системы. Необходим дальнейший поиск новых подходов к формированию системы управления преобразованиями.

Концептуальные основы управления преобразованиями национальной экономической системы в авторском понимании должны включать в себя следующие составляющие.

1. Создание системы институциональных правил и норм в экономике. В настоящее время в России вве-

дены в действие гражданский, налоговый, бюджетный, трудовой, земельный и другие кодексы; это создает институциональную базу для дальнейшего совершенствования законодательства и правового обеспечения преобразований.

2. Совершенствование отношений государства и регионов, развитие межбюджетных отношений.

3. Меры по ограничению монополистического и олигархического влияния на экономическое развитие и формирование новых принципов отношений бизнеса и государства.

4. Осуществление мер по реформированию социальных отношений путем монетизации льгот, введению новой пенсионной системы.

5. Действия и меры, направленные на устранение в действующей социальной политике перекосов, которые привели к социальной поляризации в обществе; в этой связи важное перспективное значение имеет успешное осуществление национальных проектов. Эти и другие меры, хотя и способствовали ориентации экономики на социально-устойчивое развитие, однако полностью не устранили неблагоприятные тенденции, сложившиеся на первом этапе, что не дает возможности уже на данном этапе преобразований сделать решительный поворот к эффективной модели национальной экономической системы.

6. Меры по устранению неблагоприятных тенденций изменения структурных сдвигов в экономике: не снижается доля топливно-энергетических отраслей, ориентированных на экспорт; несмотря на активизацию инновационной политики, не происходит активного развития инновационных направлений.

7. Комплекс мер по совершенствованию государственного управления структурными преобразованиями, поскольку в национальной экономике сложилась ситуация, в которой инвестиционная активность возросла, но с учетом физической и моральной изношенности основного капитала темпы роста инвестиций являются недостаточными, их структура отражает топливно-сырьевую ориентацию экономики, что сдерживает рост конкурентоспособности государства в международном рейтинге.

8. Меры по преодолению резкой социальной дифференциации и поляризации в обществе. Несмотря на предпринимаемые меры, эти важнейшие параметры экономики, свидетельствующие о социальной устойчивости, продолжают оставаться в целом в неблагоприятном состоянии; реформирование социальной сферы происходит сложно и противоречиво, об этом свидетельствует реализация мер по монетизации льгот и реформированию жилищно-коммунального хозяйства.

9. Меры по снижению относительно высокого уровня инфляции; проведение комплекса мер, которые должны способствовать более быстрому и последовательному переходу к развитию социально устойчивой смешанной экономики и быстрейшей ликвидации деформаций первого этапа преобразований.

10. Отказ от односторонности структурных преобразований и признание на деле фундаментальной экономической проблемы решительного изменения

структуры народного хозяйства в сторону наукоемких и технологически прогрессивных отраслей, ориентированных на постиндустриальное развитие. В период 2000–2010 гг. осуществлялся ряд важных шагов в этом направлении: а) принято законодательство об особых экономических зонах, ориентированных на развитие технологий; б) создан Инвестиционный фонд РФ; в) предоставляются налоговые льготы, стимулирующие покупку высокотехнологического оборудования, и т. д.

11. Реализация практических шагов по совершенствованию государственного управления, приведению роли государства в соответствие с задачами современного этапа инновационного развития. Здесь требуется признание специфических особенностей национальной экономики России, осознание необходимости укрепления рыночных основ ее экономики. Новые задачи, которые приходится решать государству, должны быть связаны с развитием и совершенствованием институциональных форм экономики: совершенствование государственного управления в процессе начатой административной реформы, антимонопольного законодательства, продолжение налоговой реформы суть необходимые направления совершенствования институциональной экономики на втором этапе развития; укрепление роли государства в отношениях собственности не только путем совершенствования законодательной базы, но и путем усиления участия государства в собственности крупнейших компаний в стратегических отраслях экономики и инфраструктурном развитии.

12. Меры по осуществлению значительных изменений, которые должны привести к созданию социально справедливого и экономически устойчивого общества, что является наиболее сложной частью задачи, которая, по нашему мнению, не может быть решена методами частичного реформирования отдельных отраслей социальной сферы. Главная проблема при этом состоит в разрешении реального противоречия между рыночными подходами и спецификой социальных отношений: рыночные критерии требуют самоокупаемости, конкуренции, свободного ценообразования, а отрасли социальной сферы ориентированы на обеспечение доступа всего населения к социальным благам, выравнивание социальных условий на территории страны, обеспечение жильем, создание условий для жизнедеятельности всей страны. В ходе преобразований необходимо искать формы и методы реформирования, которые бы не сглаживали отрицательные последствия рыночных сил в социальной сфере, а учитывали роль социальной устойчивости как важного элемента научной концепции управления преобразованиями российской национальной экономики (см. рисунок) [4].

Методологический инструментарий по каждой составляющей системы управления преобразованиями экономики, по нашему мнению, должен содержать: 1) обоснования; 2) цели; 3) действия; 4) результаты. Например, по составляющей системы управления «управление развитием наукоемких и технологически прогрессивных отраслей, производящих конкуренто-

способную продукцию» управленческие процедуры выглядят следующим образом: 1) обоснования – в современном быстроменяющемся мире жизненные циклы конкурентоспособных продуктов и технологий постоянно сокращаются, поэтому чем более эффективными являются технологии, тем более высоким будет доход предприятия и выше его конкурентоспособность; 2) цели – превратить отрасль и ее предприятия в конкурентоспособные на мировом рынке; разработать высокоэффективные технологии; 3) действия – провести аудит существующей системы управления нововведениями; реализовать современные высокие технологии; 4) результаты – отлаженные и максимально эффективные структуры управления инновационными преобразованиями; повышение конкурентоспособности продукции предприятий и отраслей [5].

Аналитическое исследование прогнозов и тенденций развития российской экономики, проведенное авторами на основании данных Министерства финансов, Министерства экономического развития РФ, Федеральной службы государственной статистики, ЦБР, Центра анализа данных ГУ ВШЭ, показало, что промышленное производство продолжает демонстрировать тенденцию текущего подъема со средней скоростью около 0,7 % в месяц. Это позволяет оценивать результат I полугодия 2010 г. как прирост примерно на 10,5 % по сравнению с таким же периодом 2009 г. и формирует перспективу повышения промышленного производства на 10 % по итогам года в целом [3]. Сектор обработки по-прежнему играет определяющую роль в динамике сводного индекса промышленного производства, демонстрируя весьма сильную тенденцию подъема со скоростью около 1,5 % в месяц. В то же время производственная активность, как в секторе добычи полезных ископаемых, так и в секторе производства и распределения электроэнергии, газа и воды, и при скорректированных данных остается в ранее наблюдавшемся состоянии стабилизации. Видно, что расчеты на сохранение текущего подъема промышленного производства в ближайшей перспективе следует, прежде всего, увязывать с продолжением роста в секторе обрабатывающих производств. Объем производства промышленной продукции в июне 2010 г., повысился на 1,5 %. В июле и августе ожидалось его повышение на 2,5 % и на 1 % соответственно. В сентябре объем производства промышленной продукции, изменился незначительно. Оборот организаций добывающих, обрабатывающих производств и производства электроэнергии, газа и воды составил в действующих ценах 2304,4 млрд руб., что соответствует 37,3 % общего оборота организаций РФ. На организации обрабатывающих производств приходится 62,6 % общего оборота организаций разделов С, D и E ОКВЭД. По расчетам Е. Ясина объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных собственными силами работ и услуг обрабатывающих производств в мае 2010 г. составил в действующих ценах 1379,9 млрд руб., что на 30,6 % выше, чем в мае 2009 г. [4]. За рассматриваемый период по всем видам обрабатывающих производств наблюдался прирост объема отгруженной продукции.

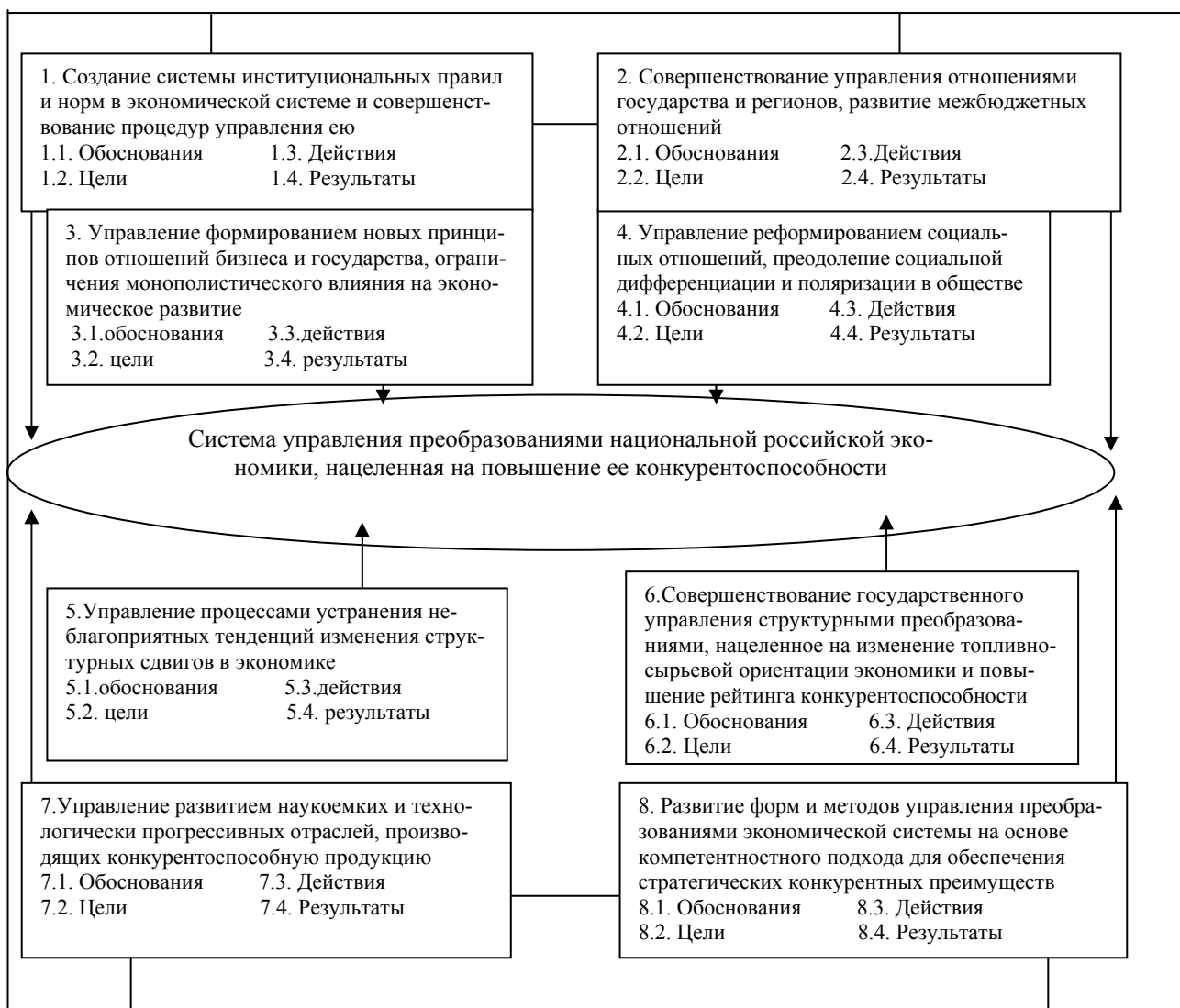
Наибольший прирост зафиксирован в металлургическом производстве и в производстве готовых металлических изделий – 61,1 % [6]. Приоритетным по объему отгруженной продукции в разделе «Обрабатывающие производства» является металлургическое производство и производство готовых металлических изделий, на долю которого приходится 19,9 %, что в абсолютном выражении составляет 274,8 млрд руб. В доминантную группу также входят производства кокса и нефтепродуктов – 18,5 %, производство пищевых продуктов – 18,4 %, производство транспортных средств и оборудования – 8,5 %. Наименьший вклад в объеме отгруженной продукции обрабатывающих производств традиционно принадлежит производству кожи, изделий из кожи и производству обуви – 0,21 %, или 2,9 млрд руб. в абсолютном выражении (см. таблицу).

Опрос руководителей организаций по добыче полезных ископаемых топливно-энергетического комплекса РФ показал, что произошло снижение индекса предпринимательской уверенности по сравнению с

маем 2010 г., с +4 % до –2 %, вне топливно-энергетического комплекса РФ отмечилось сокращение данного индекса с +4 % до +2 %. При этом воздействие структурного фактора привело к тому, что в целом по разделу «Добыча полезных ископаемых» значение индекса предпринимательской уверенности составило +2 %.

Опрос руководителей организаций обрабатывающих производств зафиксировал наилучшее состояние деловой активности в организациях производства резиновых и пластмассовых изделий +5 %.

Рост индекса предпринимательской уверенности наблюдался в производстве транспортных средств и оборудования (с –7 % до –1 %). Индекс предпринимательской уверенности оставался самым низким в производстве прочих неметаллических, минеральных продуктов –12 % и –7 %, соответственно, но под воздействием структурного фактора индекс предпринимательской уверенности обрабатывающих производств составил –3 %.



Концепция структурных преобразований национальной российской экономики и методологическая направленность управленческих воздействий

Таблица 1

Показатели развития добывающих и обрабатывающих производств в общей характеристике показателей национальной экономики России

Наименование показателя	2010 г. (май) млрд руб.	В % к		2010 г. (январь–май) в % к 2009 г. (январь–май)	Наименование показателя	2010 г. май млрд руб.	В % к		2010 г. (январь–май) в % к 2009 г. (январь–май)
		маю 2009 г.	апрелю 2010 г.				маю 2009 г.	апрелю 2010 г.	
Добыча полезных ископаемых:	501,8	129,7	94,9	144,9	Производство кокса и нефтепродуктов	286,6	128,8	96,5	135,1
Добыча топливно-энергетических полезных ископаемых	431,7	124,2	92,7	143,4	Химическое производство	110,9	126,3	98,6	134,1
Добыча полезных ископаемых, кроме топливно-энергетических	70,0	179,3	111,3	157,6	Производство резиновых и пластмассовых изделий	39,5	126,7	103,5	121,8
Обрабатывающие производства	1442,9	128,2	98,6	124,2	Производство прочих неметаллических минеральных продуктов	66,9	117,2	108,6	105,7
Производство пищевых продуктов, включая напитки, и табак	254,6	109,9	105,1	105,9	Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий. В том числе	283,8	159,2	102,2	143,5
Текстильное и швейное производство	15,2	114,2	86,2	113,5	Металлургическое производство	241,5	167,0	102,1	150,1
Производство кожи, изделий из кожи и производство обуви	3,1	114,8	84,6	114,4	Производство готовых металлических изделий	42,2	125,7	102,3	114,1
Обработка древесины и производство изделий из дерева	17,0	117,0	96,0	112,6	Производство машин и оборудования	72,6	108,1	97,7	114,4
Целлюлозно-бумажное производство; издательская и полиграфическая деятельность	45,4	114,5	97,2	111,6	Производство электрического оборудования, электронного и оптического оборудования	64,2	133,1	78,2	126,6
В том числе: производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона и изделий из них	25,3	118,6	98,6	118,7	Производство транспортных средств и оборудования	121,3	147,1	92,5	126,3
издательская и полиграфическая деятельность, тиражирование записанных носителей информации	20,0	109,6	95,5	103,6	Прочие производства	33,9	148,4	100,4	130,1

Источник: Промышленность / науч. рук. Е. Ясин // Российская экономика: прогнозы и тенденции. 2010. № 7.

По аналитическим оценкам Е. Ясина, А. Сидоровича совокупный объем средств Резервного фонда РФ составил 1 188,7 млрд руб. и сократился за месяц на 364,6 млрд руб., или на 23,5 %. Размер Фонда нацио-

нального благосостояния РФ составил 2601,6 млрд руб. и сократился за месяц на 28,7 млрд руб., или на 1,1 %.

Изученное состояние показателей развития российской национальной экономики в разрезе промыш-

ленности и результатов традиционного управления ею показывает, что на сегодняшний день сохраняется топливно-сырьевая ориентация экономики, нехарактерная для индустриально развитых стран, что, по нашему мнению, является результатом несовершенства действующей концепции управления преобразованиями экономики, сдерживается рост конкурентоспособности национальной экономической системы во внутреннем и мировом рейтингах, что свидетельствует о необходимости управленческих инновационных преобразований системы, нацеленных на изменение сложившегося положения [6].

Опираясь на правительственные документы, официальные точки зрения работников государственного аппарата, анализ имеющихся научных исследований и фактический материал по проблемам, связанным с разработкой соответствующих современному этапу развития страны методологических и концептуальных основ управления преобразованиями национальной российской экономики, автор, излагая свою методологию управленческих воздействий и авторскую концепцию структурных преобразований, полагает, что внесет определенный вклад в теорию и практику управления процессами становления конкурентоспособной национальной российской экономической системы в период дальнейшего развития рыночных реформ.

Библиографические ссылки

1. Попова Т. С. Формирование оптимальной стратегии экономического развития России и ее рейтинга среди соперничающих экономик мира в условиях оздоровления экономики / Государственное регулирование социально-экономических процессов в условиях глобального кризиса : материалы Междунар. научн.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 2. Саратов : Научная книга, 2009. С. 67–68.
2. Попова Т. С. Государственные управленческие компетенции: подходы к формированию и инструментарий оценки // Кадровик. М. : Панорама, 2010. № 11. С. 6–12.
3. Основы национальной экономики : учеб. пособие / под ред. А. В. Сидорович. М. : Дело и Сервис, 2009. С. 530.
4. Промышленность / Е. Ясин и др. // Российская экономика: прогнозы и тенденции. 2010. № 7. С. 2–6.
5. Бруковская О., Осовицкая Н. Как построить HR-БРЕНД вашей компании. 53 способа повысить привлекательность компании работодателя. СПб. : Питер, 2010. С. 288.
6. Попова Т. С. Развитие стратегических подходов к формированию конкурентных преимуществ российских менеджеров // Управление человеческими ресурсами – основа развития инновационной экономики : тез. докл. I Междунар. научн.-практ. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2009. С. 133–135.

© Попова Т. С., 2013

УДК 622.003 (075):378

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ПЛАНИРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ БАЛАНСА МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. В. Селиванов¹, И. И. Вашлаев²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: imanselivan@gmail.com

²Институт химии и химической технологии
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 24. E-mail: vash49@gmail.com

Рассматривается методика составления баланса материальных ресурсов и управление движением материальных и сопутствующих потоков на примере горного производства на основе сетевых графиков и контроля норм расхода материалов по однородным массивам входной информации по мере накопления статистики.

Ключевые слова: сетевой график, материальные ресурсы, управление, баланс.

TOOLKIT OF PLANNING AND AUTOMATED CONTROL OF BALANCE OF MATERIAL RESOURCES IN LOGISTICAL SYSTEMS OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISES

A. V. Selivanov, I. I. Vashlaev

¹ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: imanselivan@gmail.com

²Institute of Chemistry and Chemical Technology
50 Akademgorodok, building 24, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: vash49@gmail.com

The author considers technique of making out a balance of material resources and control of material and cash flows on the example of mining on the basis of activity networks and materials norm costs control according to uniform arrays of the input data, as far as statistics is accumulated.

Keywords: activity network, material resources, management, balance.

Для эффективного управления современным производством требуются новые подходы в материально-техническом снабжении. Например, для промышленных предприятий средней мощности количество номенклатурных единиц материальных ресурсов составляет несколько тысяч наименований. Возникает комплексная задача упорядочения потока поставок материальных, информационных и финансовых ресурсов во времени с учетом выполняемых работ по объектам предприятия с целью оптимизации эксплуатационных затрат и повышения надежности выполнения запланированных работ.

Возможность организации и управление движением материальных и сопутствующих потоков рассмотрим на примере горного предприятия. Процедуры материально-технического обеспечения первоначально устанавливаются по объектам раздельно. Например, пусть сетевым графиком задается совокупность работ по объекту 1 (рис. 1). Так, структуры сетевых графиков капитального ремонта драг разной модификации [1] представлены в таблице. Расчет параметров сетевого графика производится на самом графике по известному алгоритму [2; 3] по всем 12-ти событиям с их проектированием на числовую ось по ранним окончаниям работ.

Для своевременного выполнения любой работы требуется определенное количество материальных ресурсов (комплектов). Коды комплектов упорядочиваются во времени и отражаются на параллельной оси материально-технического обеспечения (МТО) с учетом имеющихся полных резервов. Особые требования предъявляются к комплектам обеспечивающим работы, принадлежащие критическому пути (на рис. 1 выделены двойной линией). Поставка этих комплектов имеет нулевой резерв времени и должна осуществляться без нарушения графика, в противном случае срывается директивная дата окончания комплекса работ объекта 1 по причине запаздывания поставок комплектов на рабочие места. Прочие комплекты, обеспечивающие работы, не лежащие на критическом пути, могут поступать на рабочие места с некоторыми задержками, не превышающими полных резервов времени по соответствующим цепочкам работ.

Преимущество данного подхода в том, что материальный поток упорядочивается во времени и в такой последовательности должны поступать комплекты материальных ресурсов на рабочие места со склада (предприятия). Для определения общего потока материальных ресурсов предприятия следует совмещать проекции поставок комплектов по всем объектам (с учетом возможного смещения начала работ от условного нуля и режима работ по объектам). Таким образом, будет сформирован объединенный поток комплектов материальных ресурсов горного предприятия на плановый период.

Объединенный график поставок является базовым документом. Затем выбирается дата самого раннего начала работ ($t_{p.n.pr}$) по совокупности объектов предприятия, учтенных в объединенном графике. Тогда момент начала заключения договоров (с внешними организациями-поставщиками комплектов материалов) определяется методом обратного отсчета от плановой календарной даты $t_{p.n.pr}$.

Следовательно, формируется такой сетевой график на поставку материалов, конечное событие которого совпадает с датой $t_{p.n.pr}$ (или поставка может завершаться с более ранней календарной датой). Следует заметить, что операции расчета параметров сетевого графика объекта 1 выполняются слева направо (и обратно для поздних окончаний и начал времени). Для смежного же сетевого графика поставок порядок расчета меняется, и расчеты производятся первоначально справа налево (и обратно для поздних начал и окончаний времени). К подготовленным смежным сетевым графикам применяют процедуры их оптимизации по известным методам [2; 3]. Трудоемкость внешних работ снабженческого периода поставки комплектов материалов (установленных по объединенному сетевому графику) на внутренний склад предприятия оценивается по выражению

$$T_{\text{пост}} = \sum_{j=1}^n t_{з.д.j} + \sum_{j=1}^n t_{опл.j} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p t_{изг.ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{d_j} t_{тран.kj} + \sum_{j=1}^n t_{погр.разг.j} + \sum_{j=1}^n t_{вр.хр.j}, \quad (1)$$

где $t_{з.д.j}$ – трудоемкость заключения договора с j -м поставщиком, чел.-дн.; $t_{опл.j}$ – трудоемкость оплаты услуг j -го поставщика, чел.-дн.; $t_{изг.ij}$ – трудоемкость изготовления (производства) i -го комплекта при его исчерпании на складах j -го поставщика (иначе $t_{изг.ij} = 0$), чел.-дн.; $t_{тран.kj}$ – трудоемкость транспортирования k -го комплекта от j -го поставщика, чел.-дн.; $t_{погр.разг.j}$ – трудоемкость погрузочно-разгрузочных работ, установленная для j -го поставщика, чел.-дн.; $t_{вр.хр.j}$ – трудоемкость временного хранения комплекта материалов от j -го поставщика, чел.-дн.; n – количество поставщиков (в том числе и потенциальных) материальных ресурсов, ед.; p – количество объектов (технологических процессов) предприятия, для которых определяется по сетевым графикам (см. рис. 1) материально-техническое обес-

печение, ед.; d_j – количество поставок материальных ресурсов от j -го поставщика в плановом периоде, ед.

Соотношения длин критических путей при разных режимах работ на объекте можно определить по равенству

$$L_{об} = T_{раб} \frac{T_{сут}}{T_{см} \cdot n_{см}} \left(1 + \frac{(7 - n_{раб})}{n_{раб}} \right) + n_{праз}, \quad (2)$$

где $L_{об}$ – длина критического пути сетевого графика, дн.; $T_{раб}$ – суммарная трудоемкость работ, лежащих на критическом пути сетевого графика с непрерывным режимом функционирования объекта, дн.; $T_{сут}$, $T_{см}$ – соответственно продолжительность суток, смены, ч; $n_{см}$ – количество смен в сутках, ед.; $n_{раб}$ – количество рабочих дней в неделе, дн.; $n_{праз}$ – количество праздничных дней, попавших в календарный период выполнения работ на объекте при прерывном режиме его функционирования, дн.

Соответствующее финансовое обеспечение поставок материальных ресурсов устанавливается по выражению

$$\Phi_{об} = \sum_{j=1}^n 3_{дj} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^p 3_{мij} + \sum_{j=1}^n 3_{пог.разг.j} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{d_j} 3_{тр.сопр.kj} + \sum_{j=1}^n 3_{вн.хр.j}, \quad (3)$$

где $\Phi_{об}$ – совокупный размер финансового обеспечения логистической цепи поставок материальных ресурсов предприятия, тыс. руб.; $3_{дj}$ – затраты на заключение договоров на поставку материальных ресурсов от j -го поставщика, тыс. руб.; $3_{мij}$ – стоимость материальных ресурсов i -го комплекта от j -го поставщика, тыс. руб.; $3_{пог.разг.j}$ – затраты на погрузочно-разгрузочные работы по j -му поставщику, тыс. руб.; $3_{тр.сопр.kj}$ – затраты на транспортирование и сопровождение k -го комплекта от j -го поставщика, тыс. руб.; $3_{вн.хр.j}$ – затраты на внешнее хранение (временное) материальных ресурсов от j -го поставщика, тыс. руб.; n, p, d_j – то же, что и в выражении (1).

Оплата поставок материальных ресурсов производится частями с учетом объединенного графика потребности комплектов по предприятию в целом. Сопутствующее финансовое обеспечение поддерживает такую периодичность поставок, которая совпадает (или не превышает) по срокам с установленными датами объединенного графика доставки материальных ресурсов на предприятие. Приоритет отдается тем вариантам поставок, которые удовлетворяют критериям минимальности трудоемкости внешних работ ($T_{пост}$) и затрат ($\Phi_{об}$), своевременности поставок материальных ресурсов, качества поставляемых материальных ресурсов, устойчивости договор-

ных отношений. Контроль и регулирование фактического расхода материалов осуществляется по алгоритму, представленному блок-схеме (рис. 2). Нормы расхода предлагается контролировать по однородным массивам входной информации по мере накопления статистики (блоки 13, 14 на рис. 2) по периодам поставок комплектов материалов и оцениваемой методами математической статистики (по t -критерию Стьюдента и F -критерию Фишера). Для этого строится двухсторонний интервал [4].

$$K = \left(\begin{array}{c} \bar{H}_j^{\Phi} - t_{\alpha/2; (N-1)} \times S / N^{0.5} \\ \bar{H}_j^{\Phi} + t_{\alpha/2; (N-1)} \times S / N^{0.5} \end{array} \right), \quad (3)$$

где $\bar{H}_j^{\Phi}$ – средневзвешенная (по объему выпуска i -го вида однородной продукции, $i = \overline{1, d}$) арифметическая величина контролируемого удельного расхода j -го материала (рис. 2, блоки 10, 12, 13, 14); $t_{\alpha/2; (N-1)}$ – табличное значение квантилей Стьюдента по заданному α -уровню значимости $(N-1)$ -й степени свободы; N – количество наблюдений (объем выборки) случайной величины H_j^{Φ} за фиксированный период производства i -го вида однородной продукции; S – среднее квадратическое отклонение случайной величины H_j^{Φ} , рассчитанное из N наблюдений.

По границам доверительного интервала K можно судить о значимости контролируемого планового норматива H_j , с помощью которого устанавливается плановая потребность в комплектах материалов. Также предлагается использовать возможности имитационного моделирования с целью контроля текущих и страховых запасов материалов. Контроль фактического расхода материалов осуществляется статистическим методом [4], что необходимо для регулирования плановых объемов поставок. Организационные отношения в логистической инфраструктуре формируются по контурно-интегрированному принципу [5]. Локальные контуры объединяются в интегрированную структуру поставок и сопровождения движения материальных, информационных, финансовых потоков. Участниками интегрированной логистической системы являются поставщики, банковские, страховые, консалтинговые, охранные и налоговые организации, предприятия-смежники, само предприятие и потребители её продукции. В качестве общего критерия рационального функционирования логистической системы принимается известное превышение финансовых поступлений от продаж собственной продукции предприятия над $\Phi_{об}$ по плановым периодам.

В итоге упорядочиваются материальные, информационные и финансовые потоки, обеспечивается контроль расходования материальных запасов, снижаются расходы на поддержание баланса материалов горного предприятия и учитываются режимы работ по его объектам.

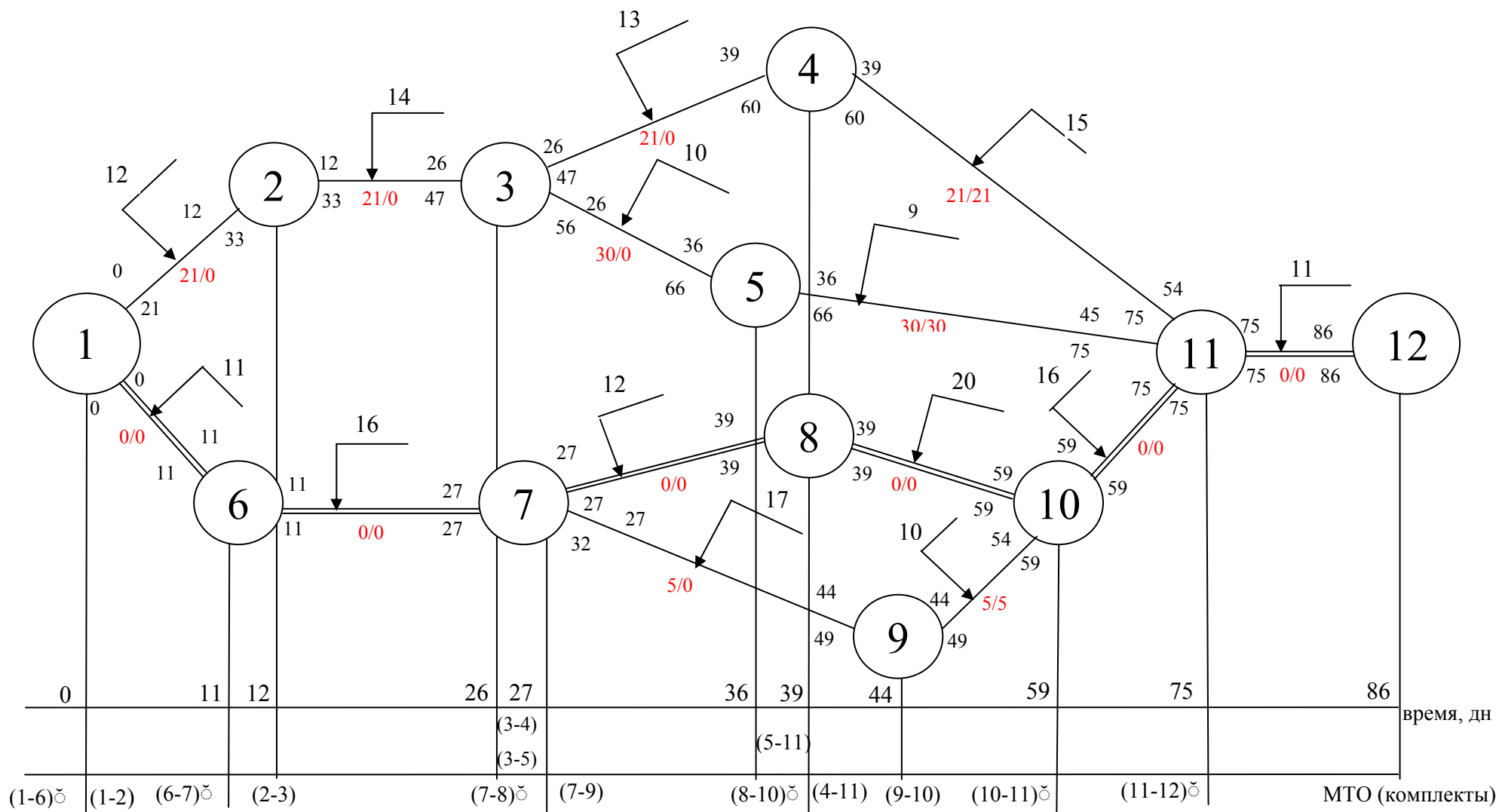


Рис. 1. Расчет параметров сетевого графика на самом графике с упорядочиванием поставок комплектов материалов по ранним окончаниям работ:
(1-6) (и другие) – комплект поставляемый к работе критического пути

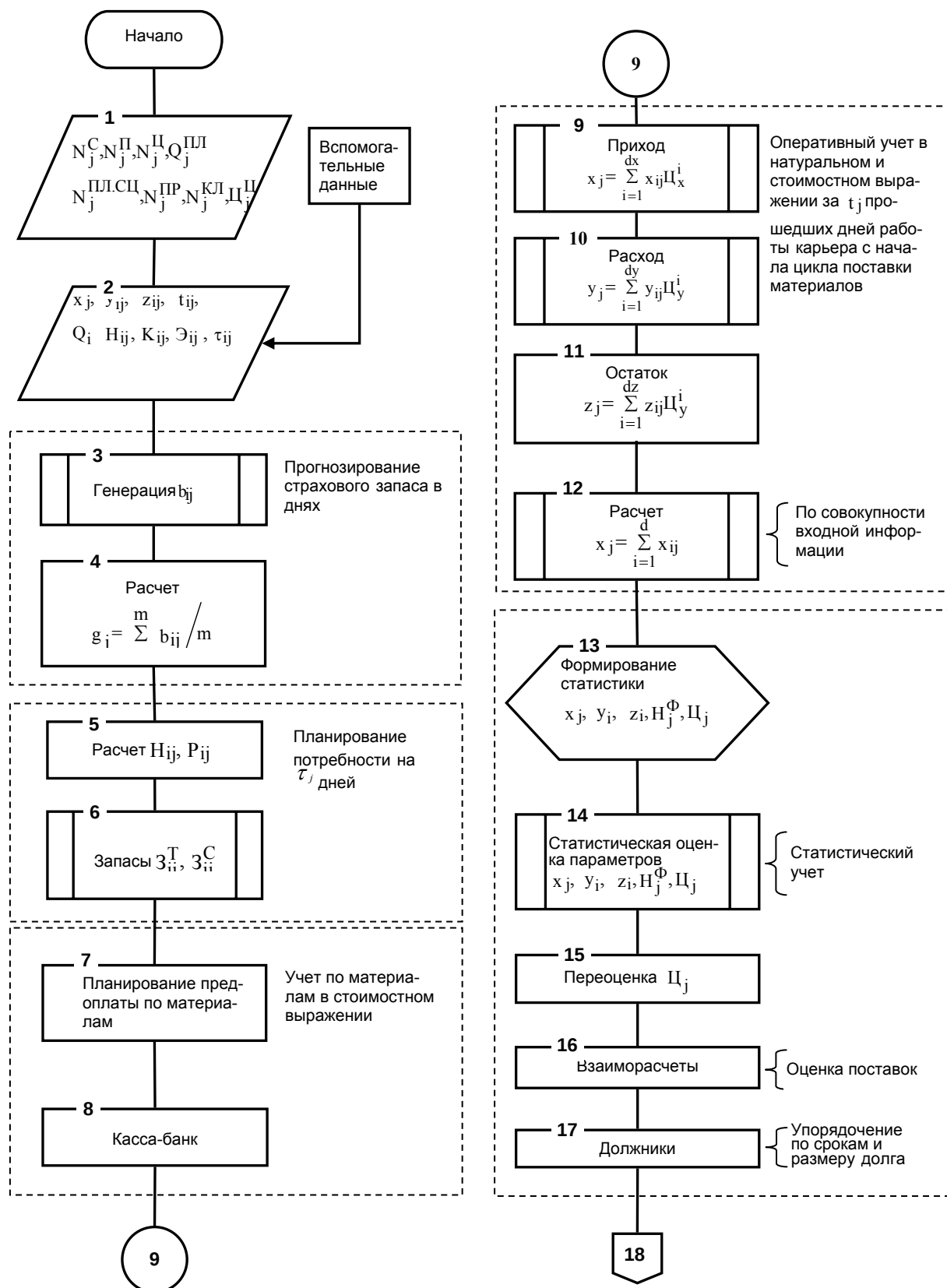
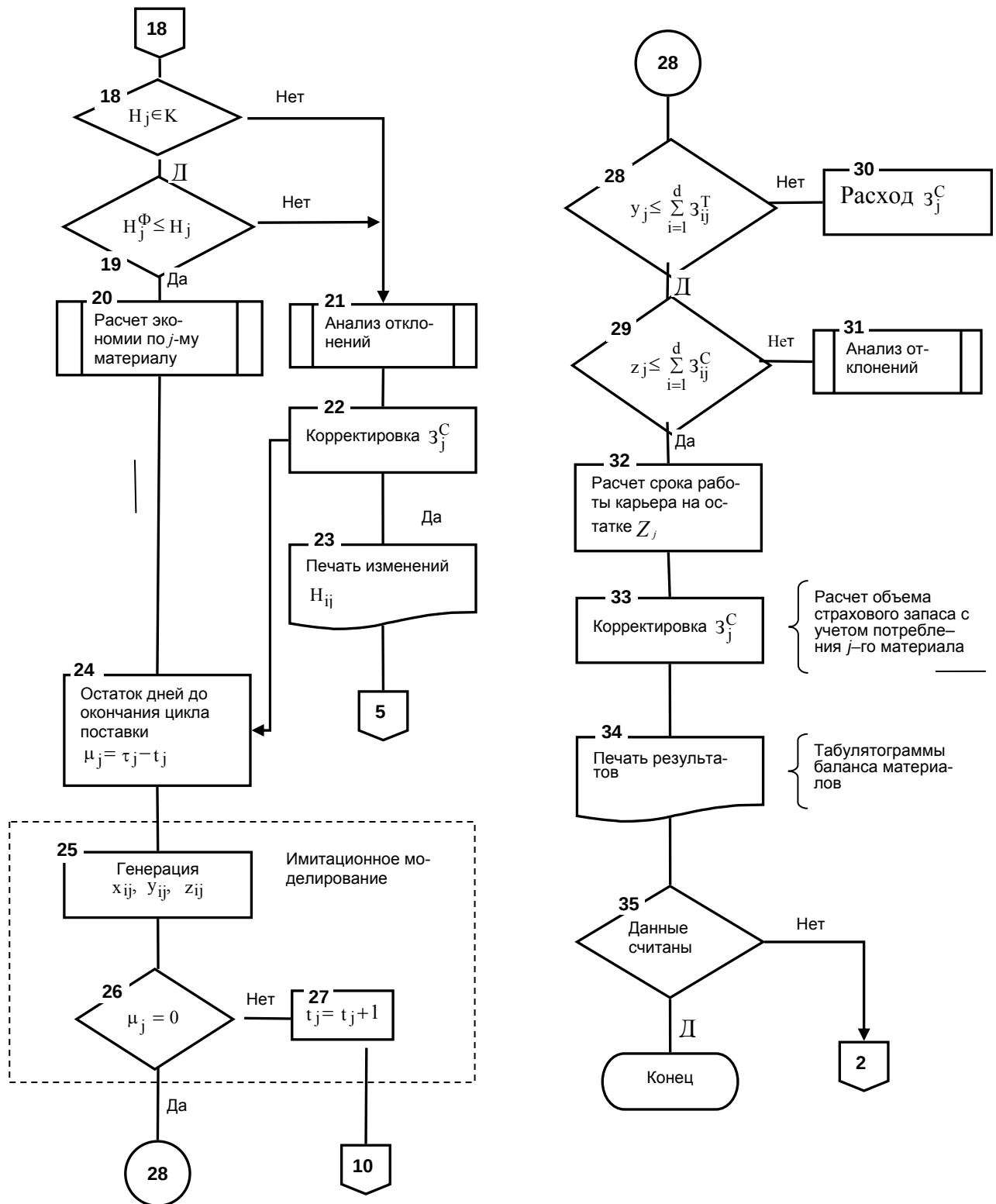
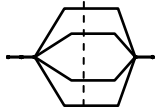
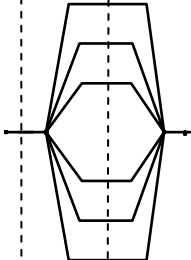
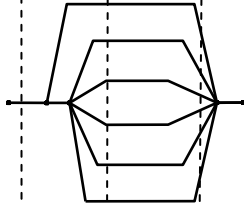
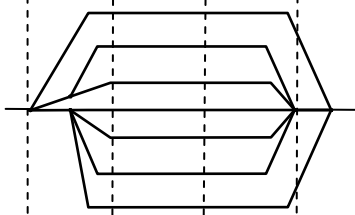


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета баланса материалов горного предприятия: $N_j^C, N_j^П, N_j^Ц, N_j^ПР, N_j^{КЛ}$ – количество кодов по складам, поставщикам, цехам, продукции, клиентам $N_j^{ПЛ.ЦЦ}$ – количество кодов счетов; $Ц_j$ – учетная цена на j -й вид материала; K – двухсторонний интервал



Окончание рис. 2

Структура сетевых графиков капитального ремонта драг различной модификации

Модель	Структура сетевого графика	Количество звеньев, шт.	Численность ремонтников, чел.	Директивный срок, дней
80Д		4	12	45
250Д		6	25	54
ОМ-431		6	42	75
600Д		7	75	97

Таким образом, предложенная методика обеспечивает:

- упорядочивание материальных, информационных и финансовых потоков;
- повышение надежности материально-технического обеспечения и соответственно повышение коэффициента технической готовности оборудования;
- контроль расходования материальных запасов и нормативов потребления материальных ресурсов с их корректировкой и экономией складских площадей;
- дифференциацию финансовых средств, необходимых на оплату поставок материальных ресурсов в соответствии с режимом работ горного производства.

Библиографические ссылки

1. Селиванов А. В., Вашлаев И. И. Методика формирования и расчёта баланса материальных ресурсов в логистических системах // Логистические системы в глобальной экономике : материалы Междунар. науч.-практич. конф. (17–18 февраля 2011 г., Красноярск) ; СибГАУ. Красноярск, 2011. С. 176–183.

2. Комащенко В. И., Школа И. Н. Организация, планирование управление предприятиями горной промышленности : учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1980.

3. Ганицкий В. И. Организация производства на карьерах. М. : Недра, 1983.

4. Автоматизированный учет материалов на горном предприятии с расчетом и контролем их баланса / В. В. Ефремов, А. В. Селиванов, И. И. Вашлаев, В. Г. Трофимов // Изв. вузов. Горный журнал, 1999. № 1–2. С. 88–95.

5. Selivanov A. V., Vashlayev I. I., Prokopovich D. A. Contour-Integrated Principle of Production Management on Mining Industry Enterprise // Logistics & Sustainable Transport : Proceedings of the 9th International Conference (14–16 June 2012, Celje). Slovenia. Published by University of Maribor, Faculty of Logistics, 2012. P. 279–283.

© Селиванов А. В., Вашлаев И. И., 2013

УДК 332.133.6

ОСОБЕННОСТИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

А. О. Славиковский, А. И. Таюрский

Сибирский государственный технологический университет
Россия, 660049, Красноярск, пр. Мира, 82. E-mail: arcezar@yandex.ru

Отражены особенности процесса инновационного развития образовательных комплексов в формировании стратегии и тактики инновационного развития Российской Федерации. Обоснованы теоретические подходы к формированию учебно-научно-инновационных комплексов на базе высших учебных заведений. Представлена оценка реорганизации университетов в университеты инновационного типа, ориентированных на современные требования рынка. Доказана целесообразность создания учебно-научно-инновационных комплексов на базе высших учебных заведений, поскольку их функционирование даст возможность ускорить процесс инновационной модернизации высокотехнологичных разработок во всех отраслях экономики Российской Федерации, приведет к увеличению конкурентных преимуществ развития экономики в будущем за счет активного внедрения в практику и продвижения на рынок продуктов научно-технической и инновационной деятельности.

Ключевые слова: образовательная система, инновационно-ориентированное профессиональное образование, образовательный комплекс, научно-исследовательская среда, высшее образование, учебный научно-инновационный комплекс.

PECULIARITIES OF THE INNOVATIVE DEVELOPMENTS OF THE EDUCATIONAL COMPLEXES

A. O. Slavikovskij, A. I. Tayurskij

Siberian State Technological University
82 Prospect Mira, Krasnoyarsk, 660049, Russia. E-mail: arcezar@yandex.ru

The article describes peculiarities of innovative development of educational complexes in formation of strategies and tactics for innovative development in the Russian Federation. The theories of formation of educational-scientific-innovative complexes on the base of educational institution are presented. Reorganization of Universities into Innovative Universities, which meet the needs of the modern society, is estimated. The authors prove practicability of creation of educational scientific innovative complexes on the basis of higher educational institutions, since it will give the opportunities to quicken the process of modernization of higher-technological elaborations in all spheres of Russian economy in the future with the help of active reduction in practice and carrying forward the products of the scientific-technical and innovational activities.

Keywords: educational system, innovative-oriented professional education, educational complex, scientific searching society, higher education, educational scientific innovative complex.

Эффективная экономика развитых стран – результат того внимания, которое уделяется проблеме внедрения достижений научного прогресса в современную рыночную экономику. Система образования как социальный институт, воссоздающий интеллектуальный потенциал страны, должна обеспечивать высокий качественный уровень выпускаемых кадров. Особенно это касается системы профессионального вузовского образования, где главным критерием глубины и качества такой подготовки должен стать инновационный процесс. Выбор инновационно ориентированного направления развития может дать системе образования высокое качество подготовки кадров и поднять уровень внедрения рынка образовательных услуг в рынок труда. Современная система высшей школы, в свою очередь, станет ориентироваться не столько на образовательный аспект, сколько на наукоемкую, технологически выверенную систему подготовки и переподготовки кадров [1].

Научно-исследовательская среда – основа развития творческой активности высших учебных заведе-

ний. Положения инновационной политики должны содействовать разработке комплекса мероприятий в системе вузовского профессионального образования, которые стимулируют инновационную деятельность высшей школы и оказывают содействие интеграции высшей школы в научно-техническое пространство. Именно данный процесс станет основой формирования стратегии и тактики инновационного развития Российской Федерации.

С точки зрения социально-экономического развития высшая школа как раз является центром науки, культуры и образования. Широкопрофильная, фундаментальная подготовка студентов, характерная для системы вузовского профессионального образования, даёт возможность продолжить обучение в данном университете на всех уровнях, включая аспирантуру и докторантуру. Смещение акцента от образовательной деятельности к научному аспекту позволяет решить многие проблемы подготовки и переподготовки кадров с учетом новых современных требований.

Научно-образовательная деятельность высшей школы основывается на скоплении инновационного потенциала, объединенного как раз в системе высших учебных заведений. Поэтому и стратегические, и тактические направления вузов построены на научно-инновационном фундаменте. Современная модернизация высшего профессионального образования направлена на то, что наука – это один из основных составляющих элементов в функционировании вуза. «Наука–инновации» в этой сфере – бесспорный элемент в получении хорошего образования, качественной подготовки кадров и, кроме того, улучшения финансово-экономического состояния вуза.

В настоящее время рыночные законы диктуют потребности товаров, которые предлагают производители, т. е. именно спрос играет роль основного фактора, регулирующего объемы предложений производителя. Высшее образование – это наука, обучение при помощи науки и сама наука как цель и результат инновационного развития. Выработка стратегии и тактики развития каждого вуза с учетом и на основе инновационных возможностей позволит ему на всех этапах инновационного цикла укрепить свое конкурентное преимущество и занять свою нишу в условиях формирования механизма инновационного развития. Кроме того, это даст ему возможность прогнозировать потребности в объемах и формах образовательных услуг, создавать и отправлять на рынок продукты инновационной деятельности.

В настоящих экономических условиях деятельность высшей школы во многом связана с особенностями, сложившимися в существующем научно-образовательном пространстве. При этом вузы изучают механизмы выживания и устойчивого развития. Несмотря на то, что пути развития этих вузов различны, идея и стратегические ориентиры очень похожи, поскольку они ориентированы на инновационное развитие. Эти вузы строят разные формы устойчивого развития и сотрудничества: комплексная подготовка кадров, ориентация студентов и преподавателей на участие в проведении научных исследований, формирование инжиниринг-центров и т. д.

Разработка наукоемких, высоких технологий допустима только при помощи аккумуляции и мобилизации интеллектуального капитала организаций науки и образования, в том числе довольно весомое положение в данном процессе отводится высшей школе. Опираясь на наукоемкие и высокие технологии, играющие особое значение для инновационного прогресса, задачи интеграции науки и высшего профессионального образования становятся определяющими для процесса инновационного развития России.

В XXI в. система высшего профессионального образования столкнулась с новыми глобальными проблемами, возникшими в результате радикальных изменений в экономической, политической и мировой системах. Главной из них стала проблема отношения университета с глобальным рынком. Новая социально-экономическая внешняя среда заставляет университеты модифицироваться в сторону организационной модели, которая дает преподавателям дополнительные свободы.

На современном этапе главная задача высшей школы состоит в поиске такой новой формы существования, которая позволит включить в себя новое рыночное измерение университетской деятельности, при этом сохраняя важнейшие функции и главные традиции университетов. Теоретики и практики менеджмента стремятся сформулировать отдельные общие подходы к трансформации университета в университет инновационного типа, отвечающий новым требованиям внешней среды, т. е. уже сейчас активно разрабатываются методы стратегического управления вузами и целевые организационные модели [2].

Современный подход к реформированию системы высшего профессионального образования состоит в необходимости адекватного управления высшими учебными заведениями исходя из условий внешней среды, так как богатство государств обусловлено не природными и технологическими параметрами, а, в первую очередь, человеческим капиталом и поэтому образование, особенно высшее, приобретает статус важнейшего компонента экономического развития.

Обширное внедрение новых экономических структур, инновационных центров, научных и технологических парков, инвестиционных фондов и т. д. содействует развитию рыночных механизмов в высшей школе, созданию новых рабочих мест в сфере науки, научно-технического предпринимательства и научно-го обслуживания, расширению международных связей с аналогичными структурами зарубежных вузов.

Проанализировав вышесказанное, можно утверждать, что новые условия, в которых сегодня работают университеты, требуют новых подходов к организации их деятельности, требуют более эффективного и гибкого управления. В системе рыночных отношений функциональные особенности и содержательная сущность управления вузами характеризуется необходимостью создания грамотной организационной структуры, мониторинга внешней и внутренней среды университета, развития вуза с позиции обучающейся организации.

При данных условиях качественно изменяется содержание, характер и технология образовательной, научно-исследовательской, финансово-экономической и производственно-хозяйственной деятельности вуза, что, конечно же, требует надлежащих изменений в системе управления деятельностью вуза:

- расширение автономии высших учебных заведений с одновременным усилением их подотчетности и ответственности перед обществом;
- децентрализация и демократизация управления;
- движение в сторону рыночных моделей организации, управления и финансирования высшего образования.

Мыслится, что правильным ответом на эти проблемы будет являться становление и развитие университетов в качестве главной составляющей развития учебно-научно-инновационной деятельности в формирующуюся инновационную экономику России.

Одним из главных факторов, обуславливающим инновационную составляющую в развитии университета, является стратегия развития высшего учебного

заведения и разработка на её основе инновационной миссии университета, которая отражает важнейшие направления развития, задачи в области научной, образовательной и инновационной деятельности. Инновационная деятельность обязана охватывать все уровни управления университетом, тем самым завлекая в научную, образовательную и инновационную деятельность сотрудников университета, аспирантов, докторантов, студентов, что позволит тиражировать наукоемкие технологии на рынок, учить студентов на основе их вовлечения в конкретную научно-инновационную деятельность.

Организационная структура университета, постигающая новые сферы и направления деятельности, углубляющаяся в новые внешние условия и тем самым вынужденная адаптироваться к ним, очевидно должна изменяться и сама. Следовательно, изучая общую структуру организации, модифицируя и совершенствуя ее, мы тем самым осуществляем своеобразное перманентное проектирование этой структуры. Система высших учебных заведений наиболее чувствительна к инновационно ориентированному развитию, и поэтому данный фактор должен быть определяющим в их структуре. Необходима поэтапная реорганизация университетов в университеты инновационного типа, ориентированные на современные требования рынка.

Создание структуры управления высшим учебным заведением должно основываться на научно-инновационном потенциале, составляющем исходные положения формирования стратегии развития университетов. В этом случае инновационно ориентированная составляющая выступает в качестве одного из факторов, обеспечивающих процесс управления и стратегическое развитие высших учебных заведений, а также усовершенствование системы управления университетом в рамках воплощения в жизнь инновационно ориентированной стратегии развития. Кроме этого в разработку комплекса мероприятий по осуществлению стратегии развития университета включается система инновационно ориентированного управления, основанная на координировании интересов образовательной и научной деятельности [3].

Формирование учебно-научно-инновационных комплексов на базе высших учебных заведений даст возможность рассматривать их как базовообразующие элементы научно-инновационного развития национальной экономики. Их деятельность будет оказывать содействие ускорению процессов инновационной модернизации высокотехнологичных разработок во всех

отраслях экономики РФ, увеличению устойчивости и обеспечению конкурентных преимуществ ее развития в будущем за счет энергичного вовлечения в практику и продвижения на рынок перспективных продуктов научно-технической и инновационной деятельности.

Процесс интеграции научно-образовательного пространства дает возможность обеспечить инновационное развитие страны в вопросе подготовки кадров и внедрения в хозяйственный оборот результатов научно-инновационной деятельности, что проявит себя в соответствующих позитивных изменениях в экономике России.

Эффективное управление высшим учебным заведением подразумевает разработку структуры управления, адекватной структуре видов деятельности по количеству управленческого персонала, затрачиваемым материальным ресурсам и, конечно же, по объему финансирования каждого вида деятельности. Это, в свою очередь, требует при расчете смет расходов на содержание вуза находить величину расходов по каждому виду деятельности. В современных условиях важность этой проблемы усиливается в том случае, когда учебные заведения активно включаются в систему рыночных отношений и имеются характерные трудности в формировании доходной части бюджета как источника финансирования непроизводственной сферы.

В конечном итоге, проанализировав все вышесказанное, можно сделать вывод о том, что в современных условиях возникает необходимость разработки теоретических и практических принципов управления высшими учебными заведениями, которые стали бы частью экономической науки, а именно, экономики образования в условиях рыночных отношений.

Библиографические ссылки

1. *Таюрский А. И., Таюрская Е. А.* Научно-обоснованные подходы к оценке образовательной составляющей государственной промышленной политики : монография. Красноярск, 2009. 125 с.
2. *Красношлыкова О. Г.* Организация инновационной деятельности образовательного учреждения // Завуч. 2002. № 7. С. 89–100.
3. *Земцов А. А.* Инновационно-ориентированная экономика: проблемы развития и поддержки научно-образовательного комплекса // Вестник Том. гос. у-та. 2009. № 3. С. 71–81.

© Славиковский А. О., Таюрский А. И., 2013

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИННОВАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Е. Л. Соколова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, пр. имени газеты «Красноярский рабочий», 31. E-mail: elizaveta-sokolova@yandex.ru

Показаны роль и значение инновационной инфраструктуры в развитии региональной экономики и сформулированы принципы ее построения: приоритетное развитие эффективных субъектов инновационной инфраструктуры, использование инструментов горизонтальной и вертикальной интеграции, соответствие условиям внешней среды и учет типологии реализуемых инноваций, использование не только регионального, но отраслевого, технологического принципа, а также применение комплексного подхода к формированию состава субъектов инфраструктуры.

Ключевые слова: инновационная инфраструктура, регион, отрасль, инновационное развитие.

PRINCIPLES OF FORMATION OF REGIONAL INNOVATIVE INFRASTRUCTURE

E. L. Sokolova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: elizaveta-sokolova@yandex.ru

The author describes the role and importance of innovative infrastructure in the development of regional economy and principles of its formation: priority development of effective subjects of innovative infrastructure, use of instruments of horizontal and vertical integration, compliance to the environmental conditions and account of typology of implemented innovations, use of not only regional, but branch and technological principle as well, and application of complex approach to formation of set of subjects of the infrastructure.

Keywords: innovative infrastructure, region, industry, innovative development.

Красноярский край занимает 3 место по итогам 2011 г. в рейтинге инновационной активности регионов России, составленном Фондом «Петербургская политика» Российской академии народного хозяйства и госслужбы при Президенте РФ и ежедневной деловой газетой «РБК daily». В то же время проблемы перехода от сырьевой ориентации экономики на инновационный путь развития не решены. Во многих концептуальных, программных документах, посвященных инновационному развитию Красноярского края [1–3], отмечается низкая инновационная активность, слабо развитая инновационная сфера, неэффективная инновационная инфраструктура и подчеркивается необходимость развития инновационной деятельности в целом и инновационной инфраструктуры в частности.

Данная проблема обостряется тем, что не сформирована концепция развития инновационной инфраструктуры как в регионе, так и на уровне Российской Федерации. Необходимо теоретическое и методическое обоснование построения региональной инновационной инфраструктуры в современных экономических условиях, уточнение основных понятий, определение роли и значения инфраструктуры в реализации инновационного процесса и разработка принципов ее построения.

Инновационная инфраструктура является частью инновационной системы, основной задачей которой является обеспечение эффективной работы основных

подсистем – получения знаний и инновационного производства, а также создание условий для завершения инновационного процесса, который, в свою очередь, наряду с накоплением и инвестиционным процессом является основой интенсивного воспроизводства.

Рассматривая содержание данного понятия, можно выделить его количественную сторону – число субъектов инновационной инфраструктуры, и качественную – комплексный характер формирования субъектов для обеспечения всех стадий инновационного процесса [4].

В России и в Красноярском крае уже сформированы различные субъекты инфраструктуры: наукограды, технопарки, инкубаторы бизнеса, ресурсные центры, консалтинговые и инжиниринговые организации, венчурные фонды и др. Рассматривая вопросы дальнейшего развития инновационной инфраструктуры, необходимо уделять больше внимания ее качественному состоянию и готовности обеспечивать выполнение следующих основных функций:

– интеграционной – интеграция между наукой и промышленностью, различными инфраструктурными субъектами, федеральными, региональными органами власти и рынком наукоемких технологий;

– внедренческой – функциональное обеспечение завершено инновационного процесса, заканчивающегося внедрением научно-технических разработок [5].

При построении инновационной инфраструктуры предлагается руководствоваться следующими принципами.

1. Приоритетная поддержка эффективных субъектов инновационной инфраструктуры. В стратегии инновационного развития Красноярского края рассматриваются вопросы формирования физической, финансовой региональной инновационной инфраструктуры, системы информационного обеспечения инновационной деятельности [3], но не предлагаются соответствующие индикаторы для оценки. Такая же ситуация просматривается и в других концептуальных и программных документах, посвященных развитию инновационной деятельности в Красноярском крае [1]. При этом многие специалисты отмечают необходимость повышения эффективности инновационной инфраструктуры.

Следовательно, для выполнения этого принципа необходимо сформировать реестр субъектов инновационной инфраструктуры; разработать показатели, критерии и методы оценки эффективности, результативности и потенциала субъектов инновационной инфраструктуры с учетом специфики их деятельности; провести их оценку и составить рейтинг.

2. Ориентация не столько на создание новых субъектов инновационной инфраструктуры, сколько на разработку и использование инструментов интеграции уже существующих на разных уровнях субъектов [5]. Повышение результативности выполнения функций инновационной инфраструктуры в инновационной системе возможно как на основе создания новых субъектов инфраструктуры (в первую очередь многоцелевых структур, например технопарков) или расширения функциональных возможностей существующих, так и на основе развития форм и способов горизонтальной и вертикальной интеграции субъектов инфраструктуры, действующих на микро-, мезо- и макроуровнях.

Как показывает анализ причин низкой инновационной активности в Красноярском крае, сформированных в Стратегии инновационного развития Красноярского края на период до 2020 г., многие проблемы связаны именно с недостаточным исполнением интеграционной функции инновационной инфраструктуры, например: существующие организации, ориентированные на поддержку инновационной деятельности, функционируют автономно, фактически не взаимодействуя друг с другом; отсутствуют модели и инструменты, эффективно интегрирующие научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки в экономическую деятельность предприятий, в региональные инвестиционные проекты и программы; недостаточный уровень участия органов исполнительной власти в реализации федеральных целевых программ и проектов, направленных на развитие инновационной деятельности; низкий уровень взаимодействия бизнеса и государства в формировании и реализации инновационной политики [3].

Решая задачу построения региональной инновационной инфраструктуры, необходимо создавать условия для интеграции субъектов инфраструктуры. В зависи-

мости от целей интеграции поддержку могут оказывать различные союзы, ассоциации, стратегические партнерства, профильные комитеты и советы при органах государственной власти. В Красноярском крае уже действует Совет по инновационному развитию Красноярского края при губернаторе Красноярского края, который решает задачи координации деятельности органов исполнительной власти края, органов местного самоуправления, предпринимательского и экспертного сообществ в области инновационного развития региона [6]. Красноярский край входит в Ассоциацию инновационных регионов России, деятельность которой нацелена на обеспечение эффективного взаимодействия субъектов Российской Федерации на основе объединения и использования научных, научно-технических и инновационных результатов развития. Требуется дальнейшее развитие организационных форм интеграции субъектов инновационной инфраструктуры.

Также необходимо учитывать изменение характеристик инновационного процесса. Переход от линейной к интерактивной, интегрированной, сетевой модели инновационного процесса предполагает привлечение сторонних участников, организаций и создание информационных и экономических систем на основе сетевого принципа с использованием инструментов аутсорсинга и краутсорсинга. В этих условиях актуальность приобретают информационно-телекоммуникационные технологии, позволяющие укрепить как внутрифирменные, так и межфирменные связи. Для этого требуется развитие информационной инфраструктуры – исследовательских сетей, специализированных сайтов, телеконференций и форумов.

3. Соответствие условиям внешней, в первую очередь конкурентной среды. Каждый регион характеризуется особой отраслевой структурой, имеет свои конкурентные преимущества, задачи развития, приоритеты инновационной деятельности, на обеспечение которых должна быть направлена формируемая инновационная инфраструктура. Реализация данного принципа предполагает, что инновационная инфраструктура должна ориентироваться, во-первых, на содействие развитию приоритетных направлений государственной поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности в Российской Федерации и Красноярском крае [7; 8], во-вторых, на решение стратегических задач регионального инновационного развития и, в-третьих, должна учитывать типологию инноваций, реализуемых в регионе. Так, поддержка базисных инноваций предполагает преимущественное формирование субъектов научной инфраструктуры, для улучшающих инноваций большую роль играют субъекты, оказывающие проектно-технологическую, производственную поддержку, консалтинговые и инжиниринговые услуги.

4. Комплексный подход к формированию состава субъектов инфраструктуры. Данный подход нацелен на эффективное выполнение внедренческой функции инфраструктуры и предполагает обеспечение поддержки всех реализуемых стадий инновационного процесса для перехода научно-исследовательских проектов в научно-технические и инновационные.

Например, для обеспечения фундаментальных и прикладных исследований может возникнуть потребность в таких субъектах инновационной инфраструктуры, как центры коллективного пользования научной аппаратурой и техническим оборудованием, экспертные советы, центры научно-технической информации, патентно-лицензионные службы, фонды поддержки научной деятельности, а также развитые субъекты социальной инфраструктуры.

Для выполнения опытно-конструкторских работ и освоения промышленного производства новых продуктов могут создаваться фонды поддержки научно-технической деятельности, венчурные фонды, центры переподготовки персонала, консалтинговые и инжиниринговые центры, проектно-технологические организации, центры защиты интеллектуальной собственности, центры сертификации.

В целях организации промышленного производства инновационной продукции могут потребоваться услуги промышленных парков, центров развития персонала, фондов поддержки малого и среднего бизнеса, венчурных фондов, бизнес-ангелов, выставочных центров, информационных порталов об инновационной деятельности и продукции региона и его ведущих отраслях.

Технопарковые структуры являются многофункциональными субъектами инновационной инфраструктуры и в зависимости от типа могут содержать элементы, направленные на решение комплекса задач инструментального, информационного, кадрового, проектно-технологического обеспечения и производственной поддержки.

Реализация данного принципа предполагает оценку потенциала субъектов региональной инновационной инфраструктуры, его адекватности осуществляемым в регионе инновационным процессам и, при необходимости, развитие инновационной инфраструктуры региона или поиск возможностей для межрегиональной, международной кооперации на основе использования проектных, сетевых и виртуальных организационных структур.

5. Использование не только регионального принципа при построении субъектов инфраструктуры, но и отраслевого, технологического. Например, аэрокосмическая отрасль является глобальной, результаты деятельности организаций этой отрасли, например космические технологии, могут иметь как федеральное, так и мировое значение и, как следствие, могут работать на повышение конкурентоспособности региона. Одним из механизмов реализации этого принципа является формирование технологических платформ на уровне Федерации и региона и поддержка участия организаций в их работе.

Применение рассмотренных принципов предполагает осуществление значительного комплекса организационно-управленческих работ, направленных, в

первую очередь, на формирование базы данных о действующих субъектах инновационной инфраструктуры, оценку их эффективности и потенциала развития, усиление связей между ними, а также формирование новых субъектов с учетом особенностей региона и задач развития приоритетных отраслей и технологий. Предложенный перечень принципов построения инновационной инфраструктуры не является исчерпывающим, но следование данным принципам позволит обеспечить перспективное развитие инновационной деятельности в регионе и интенсивное воспроизводство.

Библиографические ссылки

1. Развитие инновационной деятельности на территории Красноярского края на 2012–2014 гг. : концепция долгосрочной целевой программы [Электронный ресурс] // Красноярский край : офиц. портал. URL: [krskstate.ru>dat/bin/art_attach/1624_9.doc](http://krskstate.ru/dat/bin/art_attach/1624_9.doc).
2. Концепция развития инновационной деятельности на территории Красноярского края [Электронный ресурс]. URL: www.i-regions.org/association/news/regional/Krasnoyarsk_koncepczia.doc.
3. Об утверждении «Стратегии инновационного развития Красноярского края на период до 2020 г. «Инновационный край – 2020 : Указ Губернатора Красноярского края от 24.11.2011 № 218-уг [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru.
4. Зеленская Т. В., Соколова Е. Л. Инновационная инфраструктура: функции, уровни и формы // Вестник СибГАУ. 2012. № 2 (42). С. 162–166.
5. Белякова Г. Я., Соколова Е. Л. Инфраструктурное обеспечение инновационного развития : монография. Красноярск, СибГТУ, 2005. 136 с.
6. О создании Совета по инновационному развитию Красноярского края при губернаторе Красноярского края : Указ Губернатора Красноярского края от 02.12.2010 № 219-уг [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru.
7. Об утверждении приоритетных направлений государственной поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности в Красноярском крае : Постановление Законодательного собрания Красноярского края от 07.07.2009 № 8-3635П [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sobranie.info/lawsinfo.php?UID=6915>.
8. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899 [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru.

© Соколова Е. Л., 2013

УДК 624.014.45:658.562.6

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ КАК ОДНА ИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

И. В. Трифанов¹, Ю. Г. Новосельцев², С. А. Готовко^{1,2}, Л. И. Оборина¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: Sibgau-UKS@mail.ru

²Сибирский федеральный университет
660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: gefest_61@mail.ru

Рассмотрены проблемы и принципы построения интегрированного менеджмента процессов сварки и сопутствующих ей технологий с позиций международных стандартов. Показаны схемы источников формирования единой политики организации в области качества и расширенная схема процессного подхода СМК и порядок разработки ИСМ.

Ключевые слова: экологическая экспертиза, окружающая среда, стандарты ИСО, сварка и сопутствующие ей технологии, интегрированный менеджмент, система качества экологической и промышленной безопасности, сертификация.

INTEGRATED MANAGEMENT AS A COMPONENT OF QUALITY ASSURANCE SYSTEM IN PRODUCTION OF WELDED METAL CONSTRUCTIONS

I. V. Trifanov¹, Y. G. Novoselcev², S. A. Gotovko², L. J. Oborina¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: Sibgau-UKS@mail.ru

²Siberian Federal University
26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: gefest_61@mail.ru

The article considers problems and principles of integrated management of welding process and participative technologies from the standpoint of international standards. The authors describe the schemes of formation of uniform policy of an organization in the sphere of quality and comprehensive scheme of the process approach QMS and plan of development of IMS.

Keywords: environmental assessment, environment, ISO standards, welding and participative technologies, integrated management, quality system of environmental and industrial safety, certification.

Для повышения конкурентоспособности, расширения внутреннего рынка, увеличения экспортных возможностей в связи с вступлением России в ВТО необходимо внедрять сертифицированную интегрированную систему менеджмента качества производства сварных металлоконструкций на основе стандартов серии ИСО 9000, 14000 и OHSAS 18000 в соответствии с взаимосогласованными международными требованиями: ИСО 9000 (система менеджмента качества), ИСО 14000 (система экологического менеджмента), OHSAS 18000 (система менеджмента охраны труда и промышленной безопасности).

На оценку поставщиков по указанным международным стандартам перешло большинство предприятий западных и развитых восточных стран. Также актуально для российских предприятий то, что вышеприведенные международные стандарты содержат требования к системам менеджмента, которые являются основой построения многочисленных технических регламентов РФ.

Наличие в организации интегрированной системы менеджмента (ИСМ) является гарантией устойчивости качества продукции и высокой стабильности рынков сбыта.

Для создания интегральной системы менеджмента качества (СМК) необходима разработка единой политики организации в области качества. Источники формирования единой политики в области качества, экологической и промышленной безопасности представлены на рис. 1. Звено D_0 управленческого цикла процесса PDCA будет представлять собой управленческое взаимодействие элементов интегрированной системы менеджмента.

Совокупность элементов интегрированной системы менеджмента качества с учетом целей, которые должны быть достигнуты, показана на рис. 2.

По мнению Французской ассоциации по стандартизации AFNOR для реализации подхода к процессу как к интегральному, один из элементов может избираться базовым, а другие его расширяют или развивают (рис. 3).



Рис. 1. Схема источников формирования единой политики организации в области качества

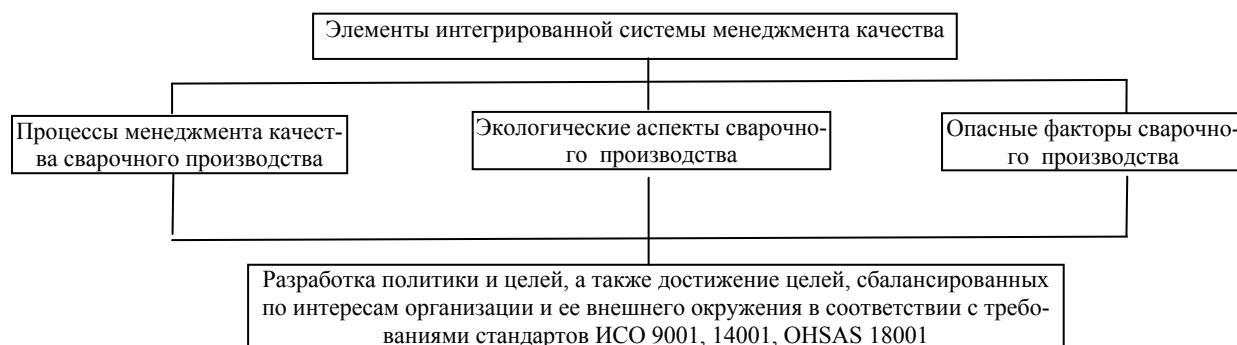


Рис. 2. Схема элементов интегрированной системы менеджмента качества



Рис. 3. Схема расширения процессного подхода СМК при производстве сварных металлоконструкций (в рамках ИСМ)

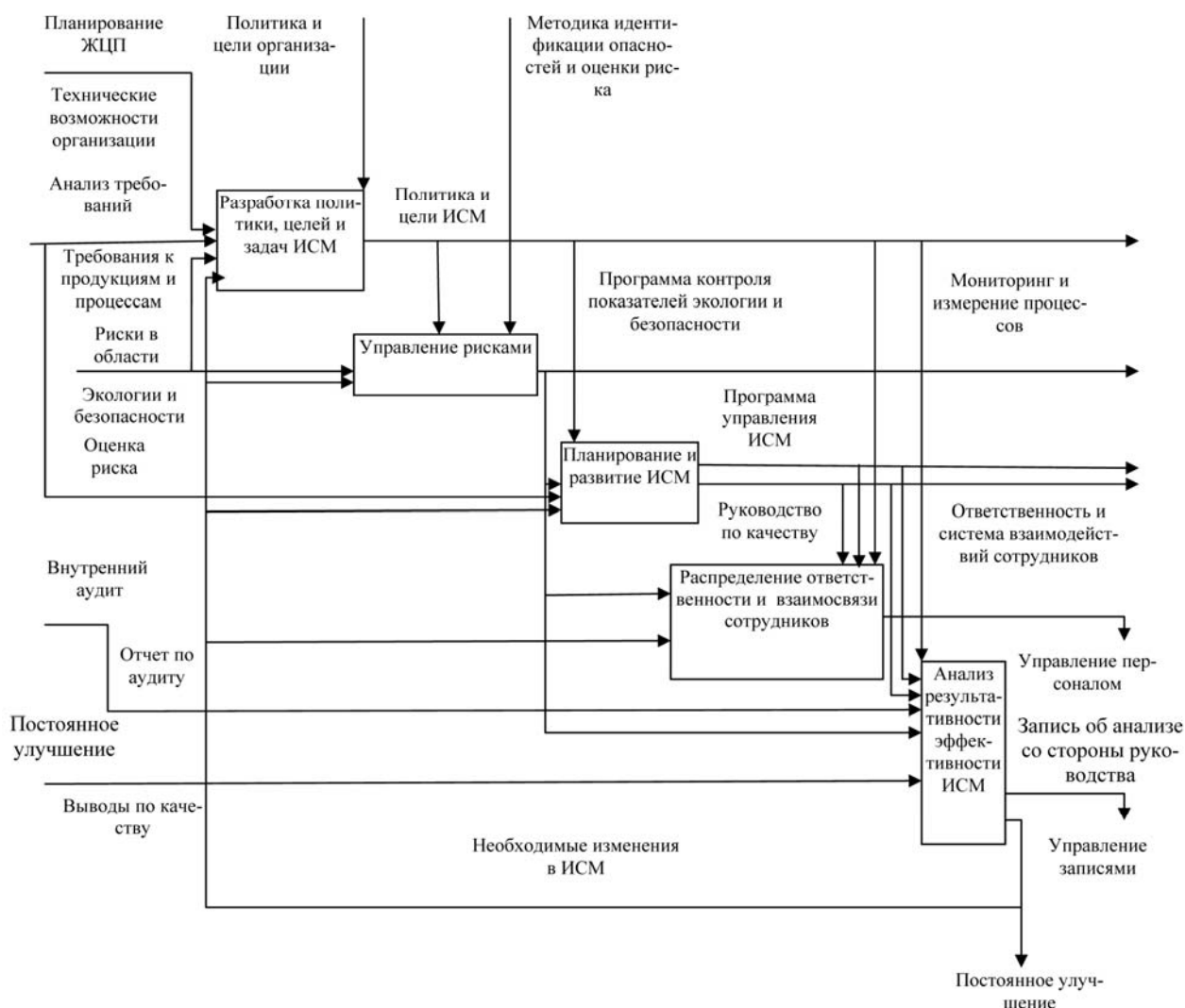


Рис. 4. Управление деятельностью организации, работающей в рамках ИСМ

Процессы не только имеют результатом выпуск продукции или оказания управленческой услуги, но и являются носителем потенциального риска выпуска некачественной продукции, причинения ущерба окружающей среде или здоровью людей.

Взаимосвязь между продукцией, экологическими аспектами и опасностями для персонала показана на рис. 3.

Процессы СМК, экологические аспекты, опасности производства можно рассматривать в интегральной системе менеджмента как триединый элемент, управляемый с помощью процессного подхода [1]. При реализации процессного подхода в разработке ИСМ рекомендуется строить графические модели системы менеджмента качества. На рис. 3 показано, как графически совместить требования стандартов ИСО 9001, ИСО 14001, OHSAS 18001. На рис. 4 показана модель «Управление деятельностью организации» [2], которая построена на использовании методологии IDEFO, позволяющей в достаточной степени детализации описать требования ИСМ, и в тоже время расширить дальнейшую декомпозицию.

Комплексный подход к управлению процессами

системы менеджмента качества позволяет повышать эффективность менеджмента путем объединения точек контроля в системе экологического менеджмента, менеджмента качества, безопасности и охраны здоровья. Необходимо при этом определять весовость вкладов процессов в систему менеджмента и определять наиболее важные из них по рискам и по материальному содержанию. Методики расчета рисков могут быть разные, например с применением метода FMEA. Подход к СМК должен быть направлен на управление процессами, позволяющими предупредить появление несоответствий, так как необходимо управлять причинами, а не следствием (рис. 4).

Идентификация и оценка элементов системы менеджмента должны предшествовать идентификации метода оценки риска, который является основой для его выбора. Порядок разработки ИСМ показан на рис. 5.

Интегрированная система – это разумное объединение систем менеджмента, результатом которого должен стать алгоритм соблюдения требований стандартов серии ИСО 9000, 14000, OHSAS 18000 при выполнении процессов сварки и сопутствующих ей технологий. На завершающем этапе разработки ИСМ

должен проводиться сертификационный аудит по ГОСТ Р ИСО/МЭК 17021–2008, который позволит оценить соответствие и эффективность разработанной ИСМ, а также подготовить ее к сертификации.

При разработке ИСМ как одной из составляющих системы обеспечения качества при производстве сварных металлоконструкций огромное значение имеет решение вопросов экологического аспекта.

Важную роль при производстве сварных металлоконструкций играет соблюдение экологических стандартов в соответствии с ИСО 14001. Уровень вредных воздействий на окружающую среду, возникающих в процессе производства и потребления продукции, характеризуют экологические показатели. Например, при выполнении сварочных работ ими являются содержание и вероятность вредных выбросов, газов, аэрозолей, излучений.

Экологической составляющей современных машиностроительных разработок уделяется все большее внимание [3]. Так, внедрение в сварочное производство омедненной присадочной проволоки для улучшения электрического контакта с наконечником при сварке в среде защитных газов и вследствие этого, уменьшения разбрызгивания расплавленного металла вызывает протест экологов. Они требуют пересмотра стандартов из-за попадания достаточно вредных паров меди в зону дыхания сварщика [4]. Значительное выделение газовой фазы требует уменьшения диаметра применяемой сварочной проволоки, хотя это ведет к снижению производительности сварки в защитных газах [5].

Экологическая экспертиза всех технологических процессов в настоящее время стала обязательной практикой в глобальном масштабе. Международная организация по стандартизации (ИСО) продолжает разработку комплекса стандартов серии 14000 по экологическому менеджменту, имеющего много общего с системами управления качеством продукции. Этот фактор определяет значительное сходство в методологиях управления качеством продукции и окружающей среды, отражающееся в некоторой общности стандартов ИСО серий 14000 и 9000. Различие указанных систем между собой заключается в том, что в качестве продукции заинтересован, прежде всего, ее потребитель, а в качестве окружающей среды – все население региона по месту нахождения предприятия, производящего данную продукцию. Это различие носит скорее формальный характер, ибо социальная общность этих людей является ее потребителем.

Активно включились в работу в области экологического управления многие организации: Международный институт сварки (IIW), Европейская сварочная ассоциация (EWF), Международная электротехническая комиссия (МЭК) и др. Сегодня промышленно развитые страны Европейского экономического союза, США и Япония активно внедряют экологические требования ИСО, EWF, МЭК. Вхождение России в это сообщество требует безусловного соблюдения единых норм и правил, в том числе и в области применения экологически ориентированных методов управления промышленностью.

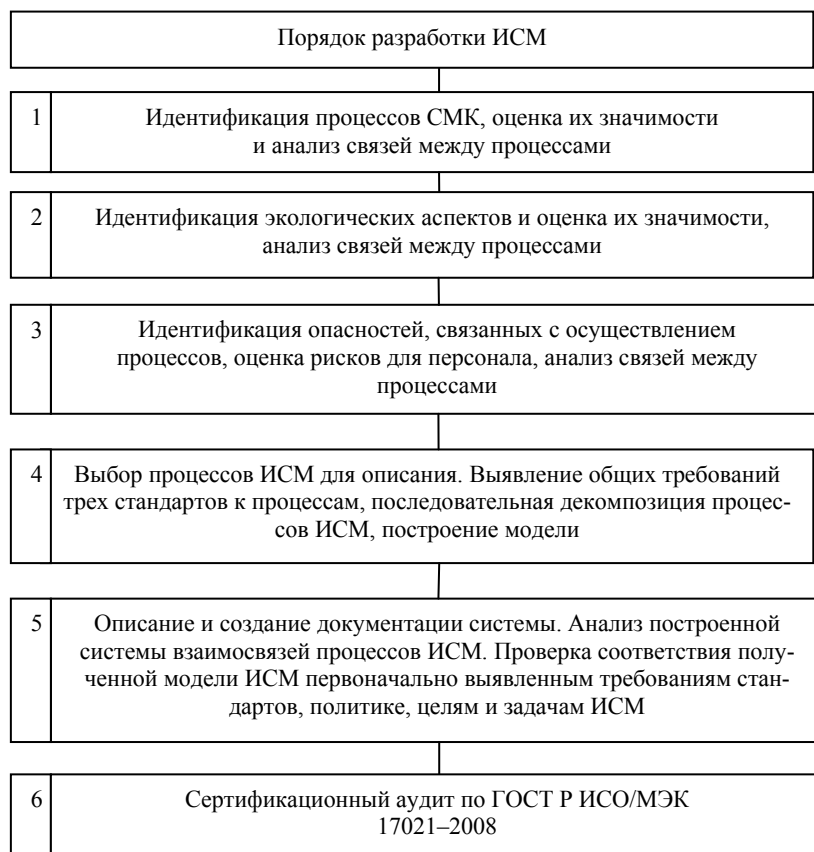


Рис. 5. Порядок разработки интегрированной системы менеджмента качества

Для России с ее огромными территориями большое значение имеет региональный аспект. В этой связи назрела необходимость в разработке и реализации программ перехода к устойчивому развитию для каждого региона. Ощутима потребность в знании местных особенностей, предусматривающих учет последствий принимаемых решений в экономической, социальной, экологической сферах, а также предусматривающих наиболее полную оценку затрат, выгод и рисков. При этом необходимо соблюдение как на общегосударственном, так и на региональном уровне следующих критериев:

- ущерб окружающей среде должен быть настолько низок, насколько это достижимо с учетом экономических и социальных факторов;

- показателями экологического благополучия должны стать характеристики состояния окружающей среды, экологических систем, охраняемых территорий (природоохранных зон, заповедников и др.), показатели качества и уровень загрязнения окружающей среды.

Сварка является одним из ключевых технологических процессов для большинства машиностроительных отраслей промышленности. Она оказывает решающее влияние на качество и эксплуатационные характеристики выпускаемых изделий и конструкций. При этом следует учитывать, что под термином «сварка и сопутствующие ей технологии» в международной практике понимают и то, что предшествует ей, сопровождает ее и реализуется в обязательном порядке после завершения сварочных работ. Сюда относятся процессы заготовительного производства, подготовки металлопроката под вырезку деталей, резки и маркировки деталей, подготовки кромок под сварку, сборки конструкций, предварительного, сопутствующего подогрева и термической обработки после сварки, неразрушающего контроля и т. д.

Исторически первыми были разработаны и внедрены системы управления качеством продукции, основные положения которых изложены в стандартах серии ИСО 9000. Важную роль в них сыграл разработанный Техническим комитетом ИСО/ТК 44 «Сварка и относящиеся к ней процессы» стандарт ИСО 3834 с первой по четвертую части под общим названием «Требования к качеству сварки. Сварка плавлением металлических материалов». Он является эквивалентом стандарту EWF EN 729 под тем же названием [3; 4].

Осмыслена «стержневая» роль сварки в большинстве машиностроительных отраслей производства, как особый процесс. Свойства сварных конструкций и изделий из них не могут быть подтверждены одним лишь испытанием. Гарантия достигается путем контроля производственного процесса. Если технология сварочного производства контролируется согласно требованиям ИСО 3834/EN 729 [6; 7], то подразумевается, что качество сварных соединений однозначно будет соответствовать установленным критериям.

При этом Генеральная ассамблея Европейского общества аккредитации подтвердила, что оценка и сертификация возможностей сварочного производства предприятия в соответствии с требованиями EN 729 может быть произведена как неотъемлемая часть

процедуры сертификации по ISO 9001/2 (EN 45012). Либо это может являться отдельной процедурой аттестации и сертификации сварочных операций и связанных с ними видов деятельности, влияющих на целостность сварных соединений. Таким образом, в сочетании с ISO 9001/2 EN 729 часть 2 («Полные требования к качеству») стала приемлемым стандартом с минимально необходимыми требованиями для производства сварных конструкций и изделий из них в объеме сертификации производства по системе управления качеством.

В соответствии с этими стандартами в Европе под эгидой IIW и EWF разработана и внедрена система аттестации и сертификации качества сварочного производства предприятий – производителей металлоконструкций и изделий из них. Европейское общество аккредитации (EA) издало директиву EA-6/02, определяющую базу для координации систем аттестации и сертификации производителей сварочной продукции. Однако EWF посчитала положения этого документа недостаточными для организации сертификации систем качества предприятий в соответствии с требованиями ИСО 3834/EN729. Минимальные требования EWF предусматривают соблюдение правил директивы EA-6/02 и дополняют их специально разработанным документом EWF 483-02, устанавливающим единые правила для всех европейских стран по организации единой системы аттестации и сертификации сварочного производства предприятий – производителей сварных конструкций и изделий из них.

В соответствии с этими правилами каждая страна, входящая в EWF должна создать на своей территории организацию – уполномоченный национальный орган по сертификации компаний (ANBCC) [8]. Присвоение статуса ANBCC (т. е. аккредитацию) для каждой страны – члена EWF осуществляет Генеральная ассамблея EWF по рекомендации технического комитета EWF. Функции ANBCC заключаются в проведении аттестации и сертификации компаний по системе управления качеством от имени EWF и IIW и в соответствии с правилами ИСО3834/EN729. Эти функции включают в себя:

- проведение аттестации компаний непосредственно или с помощью привлеченных аттестационных организаций;
- квалификацию экспертов;
- сертификацию компаний и регистрацию соответствующей информации.

Структурная схема сертификации систем качества производителей сварных конструкций и изделий из них показана на рис. 6.

Методология управления качеством продукции, качеством окружающей среды и промышленной безопасностью при внедрении интегрированного менеджмента по многим параметрам может быть общей. Там, где научились управлять качеством продукции, умеют применять экологически ориентированные и безопасные методы управления предприятием. Поэтому, разрабатывая структурную схему сертификации системы управления окружающей средой для производителей сварных металлоконструкций, EWF приняла ее подобной схеме сертификации системы качества продукции.

Более того, предусмотрено, что аттестацию и сертификацию компаний на предмет качества управления окружающей средой производят все те же ANBCC, осуществляющие сертификацию систем управления качеством продукции предприятий, производящих сварные металлоконструкции и изделия из них.

Несмотря на большое число локальных компаний, оперирующих на российском рынке сертификационных услуг, среди них не было ни одной признанной на международном уровне. Создание Российского национального органа по сертификации сварочных производств (Russian ANBCC), аккредитованного EWF и IW, стало серьезным прорывом в этой области. Следует учитывать при этом, что приходящие на рынок сертификационных услуг иностранные менеджеры вряд ли ставят перед собой задачу обеспечения выхода российской продукции на мировой рынок.

Задача интеграции России в мировую экономику при повышении качества и конкурентоспособности продукции может быть решена только российскими

компаниями. В этой связи необходимо отметить, что главный международный стандарт качества ISO 9000 подвергся серьезному пересмотру, остался не до конца понятным и оцененным в России. Необходимо помнить также, что в нашей стране есть примерно 1000–1500 предприятий, продукция которых соответствует этой системе качества, в то время как в каждой из европейских стран таких предприятий десятки и сотни тысяч.

Сертификация интегрированных систем управления качеством окружающей средой и промышленной безопасностью для технологических процессов (методов) сварки и сопутствующих им технологий, применяемых производителями металлоконструкций и изделий, является важной приоритетной задачей, для реализации которой имеются все необходимые предпосылки. В основе такой системы должна быть единая нормативная база международных стандартов, разработанных для оценки требований как к системе управления качеством продукции, так и к экологическому менеджменту и промышленной безопасности.

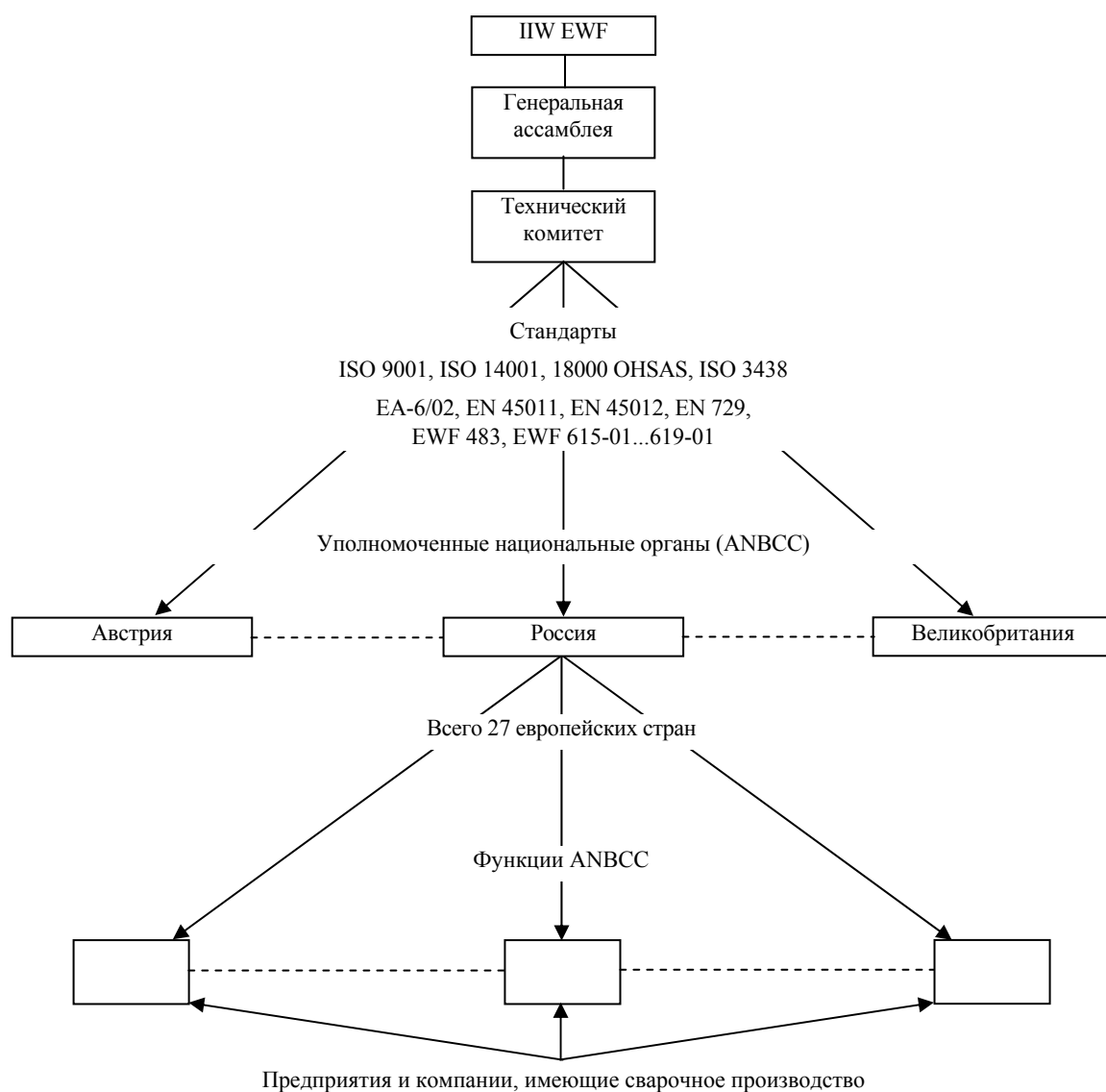


Рис. 6. Структурная схема сертификации систем качества производителей сварных конструкций и изделий из них [8]

Для производителей сварных металлоконструкций такой нормативной базой являются стандарты ISO серий 9000, 14000, 18000 OHSAS, а также стандарты ISO 3834/EN 729, EWF 415-01...419-01, EWF 483.

Порядок проведения аудита отдельных систем менеджмента качества, экологии, охраны труда и промышленной безопасности, а также интегрированного аудита регламентирован ГОСТ Р ИСО/МЭК 17021–2008 «Оценка соответствия. Требования к органам, осуществляющим аудит и сертификацию систем менеджмента».

Методологически и юридически корректное назначение в России уполномоченного национального органа по сертификации компаний – производителей сварных металлоконструкций и изделий из них (ANBCC), его аккредитация EWF и IIW и международное признание способствует укреплению авторитета РФ в международных организациях, содействует ее интеграции в мировую экономическую систему с учетом требований ВТО.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Внедрение интегрированных систем менеджмента является актуальной задачей для российских компаний, занимающихся производством сварных металлоконструкций, которые сталкиваются с серьезной конкуренцией со стороны западных и некоторых отечественных фирм, подтвердивших сертификатами свои достижения в области управления качеством, экологией и промышленной безопасностью.

2. Внедрение стандартов серии ИСО 9000, 14000, OHSAS 18000 как интегрированной системы более экономично и эффективно по сравнению с независимым внедрением нескольких стандартов на системы менеджмента, так как позволяет исключить дублирование процессов, функций подразделений, должностей и т. д.

3. Интегрированная система менеджмента, отвечающая требованиям двух или более международных стандартов и функционирующая, как единое целое, должна строиться на принципах, установленных в международных стандартах менеджмента, таких как процессный подход, системный подход, лидерство руководителя, вовлечение работников и постоянное улучшение.

4. Реализация указанных принципов позволит наилучшим образом обеспечить интегрирование положений стандартов (ИСО 9001, 14001, OHSAS 18000), направленных на отдельные системы, в единый комплекс, устранить запутанность взаимосвязей между системами управления качеством, экологией, профессиональной безопасностью и здоровьем при независимом внедрении.

5. Внедрение и сертификация интегрированной системы менеджмента качества по требованиям ANBCC при производстве сварных металлоконструкций повысит возможность предприятий обеспечивать устойчивое развитие, конкурентоспособность и высокую стабильность рынков сбыта.

Библиографические ссылки

1. Васищева С. В. Причины и следствия: процессы, аспекты, риски // Методы менеджмента качества. 2010. № 7. С. 26–31.
2. Управление деятельностью компании [Электронный ресурс]. URL: <http://quality.eup.ru/MATERIALY13/ism2/img2.GIF>.
3. Марченко А. Е., Бернадский В. Н. Экологический менеджмент по стандартам ИСО серии 14000 и его значение для сварочного производства // Технология машиностроения. 2003. № 5. С. 66–71.
4. ИСО 10882-2:2000. Здоровье и безопасность оператора при выполнении сварки и смежных процессов. Отбор проб частиц аэрозоля и газов в зоне дыхания оператора. Ч. 2. Отбор проб газов.
5. ГОСТ 2246–70. Проволока стальная сварочная. Технические условия.
6. ИСО 3834. Требования к качеству сварки. Сварка плавлением металлических материалов. 1994.
7. EWF EN 729. Требования к качеству сварки. Сварка плавлением металлических материалов. 1994.
8. Национальный орган по сертификации компаний (Russian ANBCC) : положение. 2011.

© Трифанов И. В., Новосельцев Ю. Г.,
Готовко С. А., Оборина Л. И., 2013

КОМПЛАЕНС-ФУНКЦИЯ В РЕАЛИЗАЦИИ АНТИМОНОПОЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ СУБЪЕКТОВ ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Д. О. Харченко, И. С. Ферова

Сибирский федеральный университет
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, 33-12. E-mail: Dim2603@mail.ru

Раскрываются основы формирования комплаенс-политики в инвестиционно-строительной компании. Отражены основные проблемы, представлены механизмы реализации комплаенс-функции в управлении субъектами инвестиционно-строительного комплекса. Предложена формализованная структура коммерческой политики субъекта инвестиционно-строительного комплекса.

Ключевые слова: инвестиционно-строительная компания, комплаенс-политика, антикоррупционный механизм.

COMPLIANCE AS A FUNCTION OF ANTI-TRUST POLICY OF SUBJECTS IN INVESTMENT AND CONSTRUCTION ACTIVITY

D. O. Kharchenko, I. S. Ferova

Siberian Federal University
79 Svobodnyy prospect, 33-12, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: Dim2603@mail.ru

The authors reveal the basis of formation of compliance policy in investment and construction companies, describe the main problems and mechanisms of the compliance function realization in management of subjects of investment and construction complex. Along with this the authors suggest a formalized structure of commercial policy of subjects of investment and construction complex.

Keywords: investment and construction company, compliance policy, anti-corruption mechanism.

В условиях динамики внешней среды, свойственной различным рыночным сферам, и в частности инвестиционно-строительному рынку, возрастает необходимость определения перспектив и четких ориентиров развития конкретных компаний. Такие ориентиры объединены в понятие «политика», которое в современных условиях приобретает новые трактовки.

Политика любой компании, как известно, представляет собой определенный курс деятельности или метод воздействий, выбранный среди множества альтернатив с учетом заданных условий и моделей настоящих и будущих управленческих решений. Формулировка политики компании является сфокусированной, конкретной, но в то же время не настолько конкретной, чтобы сдерживать инициативу и творчество. Политика выступает в качестве совокупности принципов, на фоне которых оцениваются задачи и цели компании.

Варианты политики следует рассматривать как совокупность директивных направлений. При этом политика объясняет не только функции, цели и задачи компании, но и определяет кодекс поведения, используемый в самой компании и ее взаимоотношениях с внешними структурами. Политика развивается не из теоретических концепций, а из предвосхищения или реагирования на ежедневные события, происходящие в деятельности компании.

Недооценка роли формирования экономической политики порождает целый ряд трудно-разрешимых

проблем [1]. К ним относятся следующие.

1. Отсутствие четко разработанной и формализованной экономической политики. При отсутствии политики возникают потенциальные проблемы с привлечением инвестиций. На практике само наличие обоснованной и достаточно глубоко проработанной экономической политики является обязательным условием, выдвигаемым инвесторами и партнерами.

2. Отсутствие достаточно полно обоснованных критериев оценки (отбора) инвестиционных проектов. Обычно существующая в компании система оценки инвестиционных проектов предусматривает лишь анализ показателей их экономической эффективности. При этом инвестиционное проектирование проводится без детального учета взаимовлияния отдельных параметров функционирования компании в целом, что затрудняет комплексную оценку экономической эффективности проекта.

3. Отсутствие механизма определения показателей оперативного (краткосрочного) плана на основе средне- и долгосрочного планов. Отсутствие корректно разработанной стратегии развития является основной причиной того, что у компании практически исчезают возможности для верной разработки средне- и долгосрочных взаимоувязанных функциональных стратегий (организационной, финансовой, инвестиционной, технической, маркетинговой и др.). Соответственно, не могут быть реализованы меха-

низмы включения краткосрочных планов фирмы в русло единой стратегии, ориентированной на достижение компанией стратегических целей и перспектив.

4. Отсутствие четко определенных антикоррупционных правил ведения бизнеса в компании. Речь идет о комплаенс-функции (комплаенс-процедурах, комплаенс-политике), которую самостоятельно реализуют сами хозяйствующие субъекты – участники рынка, с целью минимизации рисков вовлечения в коррупционные схемы ведения бизнеса.

В настоящее время комплаенс является направлением профессиональной деятельности преимущественно в финансово-банковской сфере, заимствованным из практики крупных западных компаний. Подразделения компаний, реализующие функцию проверки на соответствие (*compliance* происходит от глагола *to comply* – соответствовать), как правило, носят название «комплаенс» или «комплаенс-контроль» [1–4].

Понятие «комплаенс» связано с концепцией, объединяющей различные определения этого термина.

1. Комплаенс как программа компании, цель которой – определить, предотвратить и должным образом отреагировать на действия представителей компании, нарушающих нормы действующего законодательства, а также принципы ведения бизнеса, закрепленные во внутренних документах компании.

2. Комплаенс как «добровольно-принудительный» принцип соответствия нормам и актам.

3. Комплаенс как система мероприятий по приведению существующей в компании практики в соответствие с принятыми стандартами, законами, нормами.

Комплаенс как принцип планирования и реализации программ корпоративной этики противоположен принципу, концепции и практике *integrity* (в переводе с английского – целостность, полнота). Последний ориентируется не на внешний контроль и систему стимулов, а на понимание сотрудниками основополагающих ценностей компании, развитие их личной приверженности конкретным корпоративным ценностям, а также на процесс принятия решений, соответствующих этим ценностям, что приводит к правильным действиям и подпадает под категорию добровольности.

Представляется целесообразным расширить сферу применения комплаенс-методов. Значительный антикоррупционный эффект может быть получен, в частности, при внедрении данного инструментария в сферу государственного строительного заказа, обеспечивающего формирование конкурентного режима в госзакупках строительной продукции.

Предлагается в коммерческой политике организаций инвестиционно-строительного комплекса формулировать четкие, достижимые и контролируемые требования к потенциальным контрагентам, а также выполнять детальное описание процедур принятия решений о заключении коммерческих договоров с контрагентами с целью обеспечения противодействия коррупции в любых ее проявлениях.

Коммерческая политика – это логически последовательная и интегрированная схема принятия реше-

ний. Ее разработка должна вестись осознанно, точно и быть проактивной, т. е. упреждать влияние среды и предшествовать практическим действиям [3].

В преамбуле к коммерческой политике должно быть определено назначение инвестиционно-строительной компании в контексте её долгосрочных целей, перспективных и текущих планов действий и распределения ресурсов в условиях динамично изменяющейся рыночной среды, определена конкурентная ниша компании, выявлены (в четких формулировках) конкретные виды производимой строительной продукции.

Коммерческая политика – это реакция на внутренние сильные и слабые стороны организации, а также на внешние возможности и угрозы с целью создания преимуществ в конкурентной борьбе. Одновременно коммерческая политика является способом определения экономических и неэкономических выгод, которые инвестиционно-строительная компания может обеспечить своим акционерам, потребителям и контрагентам.

Коммерческая политика реализуется в несколько этапов и включает в себя организацию, порядок внедрения и контроля за процессом реализации политики. Коммерческая политика разрабатывается под конкретный объект инвестиционно-строительного комплекса, т. е. с учетом его организационной и управленческой структуры, специфики его деятельности, стратегических целей и задач, текущих потребностей, риск-профиля и масштабы операций. Политика должна учитывать масштаб строительной компании и наличие материальных, трудовых и финансовых ресурсов для реализации мероприятий, предусмотренных политикой. Коммерческая политика (в процессе ее формирования) должна основываться на принципах сбора, накопления, обработки и обобщения качественной исходной информации: соблюдение допущений метода начисления и непрерывности деятельности, требований понятности, уместности, существенности, полноты, надежности, правдивого представления, своевременности, сопоставимости информации, осмотрительности, приоритета содержания перед формой, непротиворечивости, нейтральности и рациональности информационных материалов, используемых при принятии решений.

Коммерческую политику субъекта инвестиционно-строительного комплекса целесообразно разграничить на конкурентную, антимонопольную и комплаенс-контрольную. При этом необходимо особо подчеркнуть, что выделенные разделы как категории являются пересекающимися по целям, принципам формирования, формам реализации, исполнителям и контролю исполнения. Предлагается выделить три основных раздела со следующими названиями:

- конкуренция – K1;
- антикоррупция – K2;
- комплаенс-контроль – K3.

Назначение первого раздела K1 (конкуренция) определение приоритетных форм и правил ведения бизнеса; четких критериев установления согласованных действий с контрагентами (сроков выполнения работ

в зависимости от выбранного базиса поставки, продажи или иного, условий предоставления скидок); алгоритма ценообразования строительной продукции; применяемых методик анализа инвестиционно-строительного рынка; оценочных категорий уровня и условий конкуренции; алгоритма самостоятельной оценки своих действий на рынке; регламента претензионной работы; положений об обязательности соблюдения антикоррупционного законодательства в договорных обязательствах с сотрудниками, посредниками, поставщиками или покупателями; указание причин возможного расторжения договоров и другие вопросы.

При этом конкурентный раздел коммерческой политики будет определять назначение инвестиционно-строительной компании, особенности конкурентной ниши, которую она занимает, принципы, правила и нормы ведения бизнеса в динамично изменяющихся рыночных условиях, которые надлежит использовать по усмотрению и на условиях заинтересованных лиц.

Первый раздел относится к категории базисно-концептуальных, где раскрываются способы организации договорных отношений с заказчиками, подрядчиками и покупателями. Именно здесь компания позиционирует свои правила делового оборота.

Назначение второго раздела К2 (антикоррупция) определение стандартов делового поведения сотрудников с заказчиками, поставщиками, коллегами, прессой, аналитиками, обществом и властью, а также процедуры делегирования полномочий сотрудникам. Ключевым термином, характеризующим антикоррупционный раздел, является поведенческий аспект.

Назначение третьего раздела К3 – в отличие от общеконцептуальных правил ведения компанией бизнеса (К1) и поведенческих норм сотрудников компании (К2), это внедрение функции комплаенс-контроля (К3). Функция комплаенс-контроля определяет правила контроля за отражением в финансовой отчетности и управленческом учете базовых стандартов ведения бизнеса компанией и правил антикоррупционного поведения сотрудников.

Комплаенс-мероприятия в целом включают получение одобрения на операции, проверку (честности и прозрачности) партнеров, обучение персонала, контрольные самооценки и мероприятия по улучшению, периодические случайные проверки уровня рисков бизнес-процессов, проводимые соответствующим подразделением, и отдельные от внутреннего аудита или инспекций группы, использование специальных программных решений (средств автоматизации комплаенс) для сбора и обработки информации.

В инвестиционно-строительном комплексе, в крупных строительных компаниях как правило функционируют службы, реализующие антикоррупцион-

ные механизмы. Однако представляется целесообразным придать им системный характер, взаимоувязав с конкурентными функциями, используя при этом внутренние комплаенс-возможности.

Обобщая, важно подчеркнуть, что коммерческая 3К политика выступает способом реализации экономической политики хозяйствующего субъекта инвестиционно-строительного комплекса. Она формализует внутренние стандарты компании в отношении правил ведения бизнеса, поведения сотрудников, контроля формирования финансовой и управленческой отчетности.

Кроме того, коммерческая политика, в отличие от иных инструментов и методов управления инвестиционно-строительной компанией, позволяет предотвратить риски нарушения действующего антимонопольного законодательства, а также формируемого антикоррупционного законодательства.

Явным преимуществом разработки коммерческой политики субъектов инвестиционно-строительного комплекса является то, что она дополняет действующую систему регулирования строительства комплаенс процедурами, обеспечивая оценку соответствия производственно-рыночной деятельности строительной организации требованиям антикоррупционного законодательства, описывает ясные требования и процедуры доступа к участию в инвестиционно-строительном процессе. Представляется, что внедрение комплаенс-функции может стать реальным инструментом антимонопольного регулирования, совершенствование которого является одной из важнейших задач в настоящее время.

Библиографические ссылки

1. *Шалимова М. А.* Комплаенс: глобальные экономические санкции // Внутренний контроль в кредитной организации. 2010. № 4 [Электронный ресурс]. URL: http://www.reglament.net/bank/control/2010_4.htm.
2. *Дмитриев М.* Антикоррупционные стандарты, корпоративное управление // Мир безопасности. 2011. Вып. 09 (214). С. 38–43.
3. *Красникова Е., Морозько В.* Программа compliance в американских компаниях // Корпоративный юрист. 2008. № 1. С. 42–44.
4. *Тысячникова Н. А.* Системный подход к реализации комплаенс-функции // Внутренний контроль в кредитной организации. 2010. № 2 [Электронный ресурс]. URL: http://www.reglament.net/bank/control/2010_2.htm.

© Харченко Д. О., Ферова И. С., 2013

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Абрамов С. С., Михеенко А. М., Гусельников А. С., Абрамова Е. С., Павлов И. И. К вопросу о повышении качественных характеристик усилителя мощности в ключевом режиме с последовательным контуром	4
Алешечкин А. М., Макаренко Г. К. Разработка навигационного фильтра для повышения точности определения координат точек тепловизионных изображений при дистанционной диагностике воздушных линий электропередачи	7
Боев Н. М., Лебедев Ю. А. Управление энергетической эффективностью совмещенных каналов передачи данных единой системы связи	11
Видин Ю. В., Иванов Д. И. Расчет собственных чисел в задаче нестационарной теплопередачи через цилиндрическую стенку при смешанных граничных условиях	15
Горяшин Н. Н., Зорин А. Н. Исследование повышающего преобразователя напряжения с переключением при нулевых значениях тока	18
Зотин А. Г., Борисов Ю. В., Лисица А. С. Сравнительный анализ методов формирования контурных представлений для поиска линий на основе метода Хафа	24
Иванов И. А., Сопов Е. А. Самоконфигурируемый генетический алгоритм решения задач поддержки многокритериального выбора	30
Иконников О. А., Первушин В. Ф. Исследование непараметрических моделей динамических систем	36
Ковалев И. В., Зеленков П. В., Сарамуд М. В., Сидорова Г. А., Брезницкая В. В. Модели ГЕРТ-сетей для различных способов применения методологии мультиверсий	41
Ковалев И. В., Полянский К. В., Зеленков П. В., Брезницкая В. В., Сидорова Г. А. Система поиска, анализа и обработки мультилингвистических текстов, интегрированная с информационно-поисковыми системами	48
Ковальский Б. И., Петров О. Н., Шрам В. Г., Сокольников А. Н., Игнатьев А. А. Прибор для испытания трущихся материалов и масел	53
Лоренц В. А., Гавриков В. Л., Хлебопрос Р. Г. Влияние числа нейронов сети на ее обучение и точность прогноза	56
Минина А. А., Пантелеев В. И., Платонова Е. В. Методика выбора параметров средств компенсации реактивной мощности в тяговых сетях переменного тока	59
Назаренко И. И., Софронова С. Н. Теоретико-групповой анализ возможных магнитных структур твердого раствора $\text{Ni}_2\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$	63
Нестеров В. А. Модальный конечно-элементный анализ балок, податливых при трансверсальном сдвиге	68
Сенашов В. И. Строение бесконечной силовой подгруппы в некоторых группах Шункова	74
Сенашов С. И., Филюшина Е. В. Линии тока для решения Прандтля	79
Синицкий Д. Е., Мурыгин А. В. Динамический стенд для исследования характеристик и режимов работы двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации КА	82
Царев Р. Ю., Пупков А. Н., Огнерубова М. А. Сержантова М. В., Бесчастная Н. А. Модель анализа надежности распределенных вычислительных систем	86
Царев Р. Ю., Штарик А. В., Штарик Е. Н., Хасанова Е. Р., Панфилова Т. А. Прямой и обратный алгоритм расчета стохастических сетей	91
Шлепки А. А. Группы насыщенности $GL(q)_2$	96
Шудрова К. Е., Лебедев Р. В., Почкаенко В. Ю. Защищенный доступ к системам видеоконференции	100

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Голдобин Н. Н. Методика оценки формы радиоотражающей поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата	106
Иванчура В. И., Краснобаев Ю. В., Чубарь А. В., Пост С. С. Энергетическая модель контроллера солнечной батареи	111
Лихачев А. Н. Особенности создания «интеллектуальных» конструкций формо- и размеростабильных систем космических аппаратов на основе диэлектрических полимерных материалов	114

Лукин Р. С., Усаков В. И., Вавилов Д. В., Иптышев А. А. Моделирование взаимодействия звеньев волновых зубчатых передач	118
Матюшев Р. А., Патраев В. Е. Вопросы разработки типовой программы сертификационных испытаний электрорадиоизделий иностранного производства, применяемых в отечественных космических аппаратах длительного функционирования	122
Орлов С. А., Копытов В. И. Нормирование и отработка бортовой аппаратуры космических аппаратов на механические воздействия	125
Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Соколовский А. В., Першин А. С. Способ настройки адаптивной фазированной антенной решетки навигационной аппаратуры потребителя ГЛОНАСС	130
Фурманова Е. А., Бойко О. Г. Метод расчета надежности функциональных систем самолетов	134

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Вавилов Д. В., Новиков Е. Е. Исследование напряженно-деформированного состояния рабочего органа машины удаления оксидной пленки с поверхности алюминиевого слитка	138
Головенко Е. А., Горемыкин В. А., Кинев Е. С., Гудков И. С., Бежитский С. С. Критерии выбора конструктивных решений оптимальных малополюсных линейных индукционных машин	142
Квеглис Л. И., Жигалов В. С., Волочаев М. Н., Джес А. В. Кластерная модель мартенситных превращений в сплаве $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$	146
Крушенко Г. Г. Повышение механических свойств лодочного винта из алюминиево-кремниевого сплава АК12 с помощью термоциклической обработки	149
Кузубов А. А., Елисеева Н. С., Федоров А. С., Федоров Д. А., Тихонова Л. В. Теоретическое исследование сорбции атомов лития на углеродных наноструктурах	152
Михалёва Е. А., Михашенок Н. В., Молокеев М. С., Флёров И. Н., Горев М. В. Теплоемкость, тепловое расширение и калорические эффекты в композите сегнетоэлектрик-ферромагнетик $0.82(\text{PbTiO}_3) - 0.18(\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3)$	159
Онуфриенко В. В. Антагонизм фаз в многокомпонентной смеси	162
Серяков А. В. Измерение температуры термисторами	167
Шестаков И. Я., Раева О. В. Оценка влияния коагуляции на степень очистки воды от ионов металлов	172
Шестаков И. Я., Ремизов И. А., Артюкова О. Е. Особенности электроконтактно-химической обработки вибрирующим электродом-инструментом	175
Янюшкин А. С., Лобанов Д. В., Архипов П. В. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании композиционных материалов	178

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Аврамчиков В. М., Антамошкин А. Н. Анализ теорий о состоянии фондового рынка	186
Восейкова О. Б. Международный рынок образовательных услуг как сфера деятельности интересов российской высшей школы	190
Гостева О. В. Инструменты анализа стратегии эффективного использования интеллектуального капитала на предприятиях ракетно-космической промышленности	196
Золотарева Г. И., Федоренко И. В. Метод учета затрат в инновационных предприятиях космической отрасли	201
Попова Т. С. Методология управленческих воздействий и научная концепция структурных преобразований национальной экономики России	206
Селиванов А. В., Вашлаев И. И. Инструментарий планирования и автоматизированного контроля баланса материальных ресурсов в логистических системах промышленного предприятия	211
Славиковский А. О., Таюрский А. И. Особенности инновационного развития образовательных комплексов	218
Соколова Е. Л. Принципы построения региональной инновационной инфраструктуры	221
Трифанов И. В., Новосельцев Ю. Г., Готовко С. А., Оборина Л. И. Интегрированный менеджмент как одна из составляющих системы обеспечения качества при производстве сварных металлоконструкций	224
Харченко Д. О., Ферова И. С. Комплаенс-функция в реализации антимонопольной политики субъектов инвестиционно-строительной деятельности	231

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Abramov S. S., Mikheenko A. M., Guselnikov A. S., Abramova E. S., Pavlov I. I. On the question of improving the qualitative characteristics of a power amplifier in a key mode with series circuit	4
Aleshechkin A. M., Makarenko G. K. Development of navigation filter for accuracy increase of coordinates of points of thermal images at remote diagnosis of overhead power lines	7
Boev N. M., Lebedev Yu. A. Energy efficiency management of communication channels	11
Vidin Yu. V., Ivanov D. I. Calculation of eigenvalues in the problem of unsteady heat transfer through a cylindrical wall with mixed boundary conditions	15
Goryashin N. N., Zorin A. N. Research of boost converter with switch at zero current	18
Zotin A. G., Borisov Yu. V., Lisitsa A. S. Comparative analysis of edge detection methods for lines search on the basis of Hough transform method	24
Ivanov I. A., Sopov E. A. Self-configuring genetic algorithm for multi-objective choice problem decision	30
Ikonnikov O. A., Pervushin V. F. Study of nonparametric models of dynamic systems	36
Kovalev I. V., Zelenkov P. V., Saramud M. V., Sidorova G. A., Brezitskaya V. V. Model of GERT-networks for different ways of usage of multi-version methodology	41
Kovalev I. V., Polyanskiy K. V., Zelenkov P. V., Brezitskaya V. V., Sidorova G. A. System of search, analysis and processing of multilinguistic texts, integrated with data retrieval systems	48
Kowalski B. I., Petrov O. N., Shram V. G., Sokolnikov A. N., Ignatyev A. A. Device for test of rubbing materials and oils	53
Lorents V. A., Gavrikov V. L., Khlebopros R. G. Influence of network neurons number to network training and forecast accuracy	56
Minina A. A., Panteleev V. I., Platonova E. V. Method of selection of parameters reactive power compensation in traction ac networks	59
Nazarenko I. I., Sofronova S. N. Group-theoretical analysis of $\text{Ni}_5\text{GeO}_4(\text{BO}_3)_2$ potential magnetic structures	63
Nesterov V. A. Modal finite element analysis of shear flexible beams	68
Senashov V. I. Structure of the infinite sylov subgroup in some Shunkov groups	74
Senashov S. I., Filyushina E. V. Current lines for Prandtl solution	79
Synitskiy D. E., Murygin A. V. Dynamical workbench for signature analysis and operating conditions of flywheel engine group of pointing and attitude control systems of spacecrafts	82
Tsarev R. Yu., Pupkov A. N., Ognerubova M. A., Serzhantova M. V., Beschastnaya N. A. Model of analysis of distributed computing systems reliability	86
Tsarev R. Yu., Shtarik A. V., Shtarik E. N., Khasanov E. R., Panfilova T. A. Direct and inverse algorithms of stochastic network calculation	91
Shlepkov A. A. Group saturated $GL_2(q)$	96
Shudrova K. E., Lebedev R. V., Pochkaenko V. Yu. Secure access to video conference systems	100

PART 2. AVIATION AND SPACE-ROCKET ENGINEERING

Goldobin N. N. Estimation of the form of a large-sized transformed reflector surface for a spacecraft	106
Ivanchura V. I., Krasnobaev Yu. V., Chubar A. V., Post S. S. An energy model of a solar cell battery controller	111
Likhachev A. N. Feature of development of "intelligent" constructions of shape- and dimension-stable structures of space vehicles from dielectric polymer materials	114
Lukin R. S., Usakov V. I., Vavilov D. B., Iptyshev A. A. Modeling the interaction of the wave gear units	118
Matyushev R. A., Patraev V. Yu. Questions of development of a standard program of certified tests of electric radio products of foreign manufacture applied in domestic spacecrafts of long functioning	122
Orlov S. A., Kopytov V. I. Rate making and development of spacecraft onboard equipment to mechanical environment	125
Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Sokolovskiy A. V., Pershin A. S. Technique for tuning of adaptive phased antenna array of navigation equipment of GLONASS customer	130
Furmanova E. A., Boyko O. G. Airplanes functional systems reliability calculation method	134

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Vavilov D. V., Novikov E. E. Research of stress-strain condition of working body of the machine for removal of oxide film from surfaces of aluminium ingots	138
Golovenko E. A., Goremykin V. A., Kinev E. S., Gudkov I. S., Bezhitskiy S. S. Choice criteria for constructive decisions of optimum low-polar linear induction machines	142
Kveglis L. I., Zhigalov V. S., Volochaev M. N., Dzhes A. V. Cluster model of martensitic transformations in the alloy $\text{Fe}_{86}\text{Mn}_{13}\text{C}$	146
Krushenko G. G. Improvement of mechanical properties of boat-type screws of aluminium-silicon alloy AK12 with the help of thermal-cycle processing	149
Kuzubov A. A., Eliseeva N. S., Fedorov A. S., Fedorov D. A., Tikhonova L. V. Theoretical research of sorption of atoms of lithium on carbon nanostructures	152
Mikhaleva E. A., Mikhashenok N. V., Molokeevev M. S., Flerov I. N., Gorev M. V. Heat capacity, thermal expansion and caloric effects in ferroelectric-ferromagnetic composite $0.82(\text{PbTiO}_3) - 0.18(\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3)$	159
Onufrienok V. V. Antagonism of phases in multi-component mixtures	162
Seryakov A. V. Thermistor thermometry	167
Shestakov I. Ya., Raeva O. V. Assessment of coagulation influence on index of purification of water from metal ions	172
Shestakov I. Ya., Remizov I. A., Artyukova O. E. Features of electro-discharge-chemical machining with vibrating electrode-tool	175
Yanyushkin A. S., Lobanov D. V., Arhipov P. V. Loss of cutting ability of metal bound diamond wheels at grind of composite materials	178

PART 4. ECONOMICS

Avramchikov V. M., Antamoshkin A. N. Analysis of stock market state theories	186
Voeykova O. B. International market of educational services as the sphere of interests of Russian higher school	190
Gosteva O. V. Instruments for analysis of effective use of intellectual capital in the conditions of innovative economy at the enterprises of the rocket and space complex	196
Zolotareva G. I., Fedorenko I. V. Cost accounting method in innovative enterprises of rocket and space industry	201
Popova T. S. The methodology of managerial effect and the scientific concept of reforms in the national economy of Russia	206
Selivanov A. V., Vashlaev I. I. Toolkit of planning and automated control of balance of material resources in logistical systems of the industrial enterprises	211
Slavikovskij A. O., Tayurskij A. I. Peculiarities of the innovative developments of the educational complexes	218
Sokolova E. L. Principles of formation of regional innovative infrastructure	221
Trifanov I. V., Novoselcev Y. G., Gotovko S. A., Oborina L. J. Integrated management as a component of quality assurance system in production of welded metal constructions	224
Kharchenko D. O., Ferova I. S. Compliance as a function of anti-trust policy of subjects in investment and construction activity	231

Требования к оформлению статей для опубликования в журнале «Вестник СибГАУ»

Общие требования. Тексты представляются в редакцию в электронном и печатном виде. Оригинал должен быть чистым, не помятым, без правок, вписанных от руки. Страницы нумеруются карандашом на обороте.

Печатный оригинал должен полностью совпадать с электронным вариантом статьи.

Файлы со статьями принимаются на CD-диске, флешке (без вирусов) или по электронной почте.

Статьи в распечатанном виде авторы сдают лично секретарю журнала или высылают по почте с указанием обратного адреса (для иногородних).

ВНИМАНИЕ! На последней странице обязательно ставится **подпись автора(ов)** статьи.

Количество авторов одной статьи не более 5-ти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй в соавторстве.

Индекс УДК предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

Электронная копия. Статья набирается в программе **Microsoft Office Word 2003!**

Содержание. 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.

Объем статьи: 3–8 страниц (включая рисунки, таблицы и библиографические ссылки), краткое сообщение – 1–2 страницы.

Параметры страницы. Формат А4 (210×297). Поля: правое и левое – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см.

Текст. Шрифт – Times New Roman, размер 12 пт.

Не допускается (!) набирать тексты прописными (заглавными) буквами и жирным шрифтом (кроме названия), а также размещать все указанные элементы в рамках и имитировать оформления набора, выполняемого в журнале.

При представлении научной статьи в журнал «Вестник СибГАУ» необходимо придерживаться **следующей схемы:**

Блок 1 – на русском языке:

- название статьи (по центру жирным шрифтом прописными буквами);
- автор(ы) (по центру строчными буквами);
- адресные данные авторов (организация(и), адрес организации(й), электронная почта всех или одного автора);
- аннотация (авторское резюме);
- ключевые слова.

Блок 2 – информация Блока 1 в романском алфавите (транслитерация¹ и перевод соответствующих данных) в той же последовательности: авторы на латинице (транслитерация); заглавие, аннотация, ключевые слова, название организации, адрес организации – на английском языке.

Блок 3 – полный текст статьи на русском или другом языке (язык оригинала).

Блок 4 – Список литературы с русскоязычными ссылками на русском языке по ГОСТ 5.0.7 (для статей на русском языке).

Блок 5 – Список литературы с русскоязычными и другими ссылками в романском алфавите.

Название списка литературы должно быть на английском языке: REFERENCES, но ни в коем случае не транслитерированным: SPISOK LITERATURY.

Аннотация. Аннотация должна состоять минимум из 100–250 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк) и включать следующие аспекты содержания статьи:

- предмет, тему, цель работы;
- метод или методологию проведения работы;
- результаты работы;
- область применения результатов;
- выводы.

Аннотация на английском языке на русскоязычную статью по объему может быть больше аннотации на русском языке (но не более 850 знаков), так как за русскоязычной аннотацией идет полный текст на этом же языке.

¹ Транслитерация – перевод одной графической системы алфавита в другую (то есть передача букв одной письменности буквами другой). Пример Т.: немецкий Schiller – русский «Шиллер».

Основной текст статьи размещается через пробел от резюме. Межстрочный интервал – одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается. Внутренние подзаголовки статьи центрировать.

Абзацный отступ равен 0,5 см.

Ссылки на использованные в статье источники заключают в квадратные скобки и последовательно нумеруют, например [1].

Примечания: 1. Смысловые пояснения основного текста или дополнения к нему оформляются в виде внутритекстовых примечаний среди строк основного текста специальной рубрикой, выделенной светлым курсивом: *Примечание:* (одно примечание), *Примечания:* (несколько примечаний). Отделяются от текста точкой (если стоят в единственном числе в подбор к тексту примечания).

Примечания должны быть последовательно пронумерованы.

2. При наличии гранта ссылка на грант помещается внизу полосы под строками основного текста (подстрочное примечание).

Формулы. Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны без использования специальных редакторов. Специальные сложные символы, а также многострочные формулы, которые не могут быть набраны обычным образом, должны быть набраны в редакторе формул Math Type. Набор математических формул в пределах всего текста должен быть единообразен:

- размеры символов определяются стандартными установками Math Type (Размер – Определить – Заводские),

- русские и греческие символы – прямым шрифтом,

- латинские – курсивом.

Формулы, набранные отдельными строками, располагают по центру.

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

Таблицы должны быть последовательно пронумерованы. Слово «таблица» набирается светлым курсивом с выравниванием вправо, шрифтом 11, например, *Таблица 1* ниже – заглавие таблицы (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.

Иллюстрации. Иллюстрации и подписи к ним должны быть вставлены в текст статьи и дополнительно прикреплены отдельным файлом любого распространенного графического формата (например, .jpg, .bmp, .tiff и т. п.). Иллюстрации последовательно пронумеровываются обычным шрифтом без кавычек с выравниванием по центру, например, Рис. 1. Могут содержать подрисовочную подпись, шрифтом 11 пт. Рисунки могут быть сканированы с оригинала (в этом случае они должны быть четкими, контрастными, без лишнего фона) или выполнены средствами компьютерной графики. Цветные иллюстрации не принимаются.

К печатному варианту статьи необходимо приложить:

1. **Экспертное заключение** о возможности открытой публикации.

2. **Внешнюю рецензию** (рецензент не ниже ученой степени доктора наук).

3. **Сведения об авторе** предоставляются на русском и английском языках и оформляются в следующей последовательности:

- фамилия, имя, отчество (полностью);

- ученая степень, звание;

- должность, место работы;

- вуз, год его окончания;

- область научных интересов;

- e-mail;

- номер телефона;

- адрес для переписки (для иногородних).

В сведениях об авторах нельзя использовать аббревиатуры и сокращения.

Статьи рецензируются. Отклоненные материалы не возвращаются.