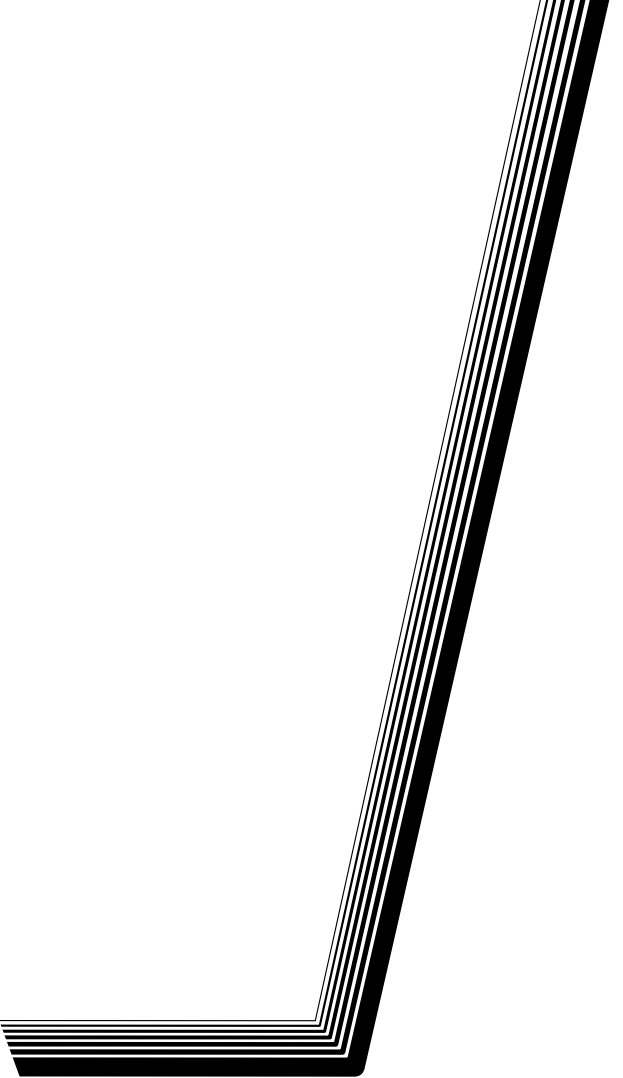


ВЕСТНИК



Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 3(49)

Красноярск 2013

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 3(49)

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

В статьях сохранен авторский стиль изложения.

Редактор английского текста А. Г. Никитина

Оригинал-макет и верстка М. А. Светлаковой

Подписано в печать 21.10.2013. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 29,1.

Уч.-изд. л. 36,7. Тираж 1000 экз. Заказ 87/192. С 164/13.

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



УДК 004.891.2

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОРГАНИЗАЦИЙ

О. А. Антамошкин, Г. А. Пузанова, В. В. Онтужев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
E-mail: puzanova679@gmail.com

Рассматриваются критические аспекты системы экспертной оценки информационной безопасности в организациях, проводится сравнительный анализ возможных архитектур системы, классификация основных областей информационной безопасности, которые обрабатывает система, описываются основные функции, подсистемы и пользовательские прецеденты рассматриваемой системы экспертной оценки. Выявлено, что архитектура Web-приложения является оптимальной для разрабатываемой системы. Выделены уровни информационной безопасности, оцениваемые в системе: физический, инфокоммуникационный, процедурный административный уровень, анализируемые в контексте важных информационных активов организации. Всего спроектировано 4 основные функции и 6 подсистем экспертной системы.

Ключевые слова: информационная безопасность, архитектура, экспертная система, прецеденты, функции.

DESIGN FEATURES OF THE COMPUTER-AIDED SYSTEM OF ENTERPRISE INFORMATION SECURITY EXPERT ASSESSMENT.

O. A. Antamoshkin, G. A. Puzanova, V. V. Ontuzhev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia.
E-mail: puzanova679@gmail.com

The article considers the critical aspects of design of the computer-aided system of the enterprise information security expert assessment, along with comparative analysis of the possible system architecture, classification of the major areas of information security, which are handled by the system and describes the key features, subsystems and custom use cases of the system. It was revealed that the architecture of Web-based applications is optimal for the system being developed. The levels of information security assessed with the system, such as: physical, ICT, administrative procedural level are analyzed in the context of important information assets of a certain enterprise. The authors designed four main functions and six subsystems of the expert system.

Keywords: information security, architecture, expert system, use cases, functions.

В современной экономической ситуации представляется целесообразным создание системы экспертной оценки информационной безопасности в организациях (СЭОИБО). Данная система предназначена для проведения экспертной оценки защищенности предприятий малого и среднего бизнеса и других организаций аналогичного масштаба. Особенностью эксплуатации данной системы является ее применение в организациях пользователями, не имеющими специальных знаний в области информационной безопасности.

В силу приведенных свойств, на начальном этапе проектирования системы особое внимание уделяется таким вопросам, как: выбор оптимального типа архитектуры, определение уровней анализа и их приоритетности, разработка концепции алгоритма экспертной системы.

Целью данного исследования является пошаговое определение и обоснование приведенных выше критических аспектов проекта экспертной системы оценки информационной безопасности в организациях.

Выбор системной архитектуры. Разработка экспертной системы, как правило, предполагает создание базы знаний. В контексте СЭОИБО необходимо предусмотреть возможность сохранения введенных пользователем данных для будущего использования и статистической обработки.

При проектировании СЭОИБО рассмотрено три варианта системной архитектуры с использованием баз данных: локальное однопользовательское приложение со встраиваемой системой управления базой данных, приложение для использования на локальном сервере конкретной организации, Web-приложение, единое для всех пользователей.

В локальном приложении работа с базой данных скрыта от пользователя, доступ к ней вне приложения невозможен, что обеспечивает необходимый уровень абстракции. Вся работа по вводу данных осуществляется с одной рабочей станции.

Плюсами локальной архитектуры являются:

- отсутствие необходимости передачи данных по сети, следовательно, большая защищенность данных;
- простая установка программы;
- низкая вероятность стороннего доступа к базе знаний;
- возможность работать на компьютере, изолированном от сетей передачи данных;
- абстракция архитектуры – наличие базы данных полностью скрыто от пользователя.

В контексте разрабатываемой системы локальная архитектура имеет следующие недостатки:

- невозможность сбора статистики у пользователей для дальнейшего совершенствования алгоритмов экспертной оценки;
- сложность осуществления экспертизы с привлечением нескольких сотрудников организации, имеющих наиболее достоверные сведения в каждой из анализируемых сфер деятельности организации, таких, как управление персоналом и применяемые информационные технологии;
- сложность массового обновления программы при улучшении ее алгоритмов;
- сложность обеспечения кроссплатформенности приложения;
- необходимость предусматривать дополнительные меры контроля количества установленных экземпляров приложений.

Основное препятствие при применении данной архитектуры – отсутствие многопользовательского режима, препятствующее участию в экспертизе нескольких сотрудников, а единственный пользователь, ответственный за экспертную оценку, как правило, не обладает всеми необходимыми сведениями для ее проведения. Время, затраченное на получение всей необходимой информации, значительно уменьшит скорость работы с системой.

Архитектура локального серверного приложения предполагает установку на один сервер многопользовательского приложения, содержащего в себе систему управления базой данных и систему обработки данных, в которой реализован экспертный анализ. Все функции интерфейсной подсистемы выполняют клиентские приложения, которые будут устанавливаться на произвольное количество рабочих мест организации. Доступ к серверу может осуществляться либо по локальной вычислительной сети, либо через сеть связи общего пользования.

У данной архитектуры было выявлено одно основное преимущество – возможность работы нескольких пользователей с одним набором данных. Это позволит отразить несколько взглядов на защищенность организации в одной экспертизе, что существенно повысит достоверность экспертиз.

Недостатками такой архитектуры являются:

- сложность установки программы для неопытных пользователей;
- основная нагрузка по обеспечению безопасности передачи данных ложиться на организацию – пользователя системы;
- необходимость организации сервера;
- требования к производительности сервера приложения влекут за собой высокая стоимость оборудования;
- как правило, поддержка данной конфигурации требует отдельного специалиста – системного администратора;
- сложность обеспечения непротиворечивости данных у приложения-клиента и сервера;
- пользователь должен иметь канал связи с достаточной пропускной способностью;
- сложность массового обновления программы из-за распределенности приложения;
- необходимость при разработке обеспечить поддержку различных операционных систем у клиента и сервера;
- необходимость дополнительных мер контроля количества установленных экземпляров, как программы-сервера, так и программы-клиента;
- усложнение разработки из-за необходимости учитывать особенности и клиент-серверной и трехуровневой архитектур приложений.

В силу приведенных выше недостатков, данная архитектура не отвечает задачам системы, поэтому не может быть применена при ее создании.

Еще один вариант, это классическую трехуровневую архитектуру Web-приложение.

У архитектуры Web-приложения можно назвать такие достоинства, как:

- наибольшая простота доступа пользователя к ресурсам системы;
- любое усовершенствование системы сразу доступно всем пользователям;
- введенные данные с разрешения пользователя можно анонимно использовать для анализа и дальнейшего совершенствования алгоритма экспертных оценок;
- полностью прозрачная архитектура системы для разработчика, при этом ее особенности скрыты от пользователя;
- возможность доступа к системе с различных устройств и систем;
- максимальное обеспечение целостности и непротиворечивости данных;
- скорость формирования экспертных оценок и других действий не зависит от аппаратного обеспечения пользователя;
- низкие требования к пропускной способности канала связи пользователя, так как передаются только зашифрованные текстовые данные небольшого объема;
- пользователю не нужно принимать меры для обеспечения защищенности своих данных в системе;

- полный контроль за количеством организаций, использующих систему, и частотой экспертиз;

- возможность предоставления пользователю постоянно обновляемой дополнительной информации по обеспечению информационной безопасности бизнеса.

При рассмотрении данной архитектуры, необходимо учитывать следующие недостатки:

- необходимость обеспечить защиту данных при их хранении и передаче;

- обеспечение параллельной работы большого количества пользователей;

В результате проведенного анализа, выявлено, что архитектура Web-приложения является оптимальной для разрабатываемой системы.

В качестве клиента Web-приложения выступает браузер, в качестве сервера баз данных – одна из существующих систем управления базами данных, в качестве сервера приложений система экспертной оценки

Выбор системы управления базой данных и языка логики приложения. База данных должна совмещать в себе функции базы знаний (хранить данные, необходимые для оценки и правила их обработки), хранилища данных, введенных пользователями, а так же конфигурационных и других данных, необходимых для организации работы Web-приложения [1].

Для того чтобы компенсировать недостатки, найденные при анализе данной архитектуры, необходимо применить шифрование данных AES, зашифрованный протокол передачи данных через Web-узел, защиту от внедрения SQL кода (SQL injection) и межсайтового скриптинга (Cross Site Scripting, XSS).

Был проведен анализ возможных средств реализации данной архитектуры, в том числе системы управления базами данных Firebird.

Многоверсионная архитектура, являющаяся несомненным преимуществом Firebird, обеспечивает параллельную обработку аналитических и оперативных запросов, следовательно, что читающие и пишущие обращения к базе не блокируют друг друга [2].

Для создания логики приложения была осуществлена подборка языка программирования, оптимального для решения задач СЭОИБО [3].

Преимуществами языка Web-разработки PHP является его традиционность; простота; эффективность; безопасность; гибкость.

Таким образом, для реализации системы выбрана система управления базами данных Firebird и скриптового языка программирования общего назначения PHP.

Создание алгоритма экспертной оценки. Информационная безопасность организации – обширная область для анализа, следовательно, для реализации алгоритма экспертной оценки, необходимо ее разбиение на более короткие области.

В базовой модели угроз безопасности персональных данных ФСТЭК России выделяет 5 различных уровней функционирования информационных систем защиты персональных данных: аппаратный уровень,

на уровень микрокодов и драйверов устройств, уровень операционной системы, уровень прикладного программного обеспечения, уровень функционирования каналов передачи данных и линий связи [4].

Еще одна распространенная классификация уровней информационной безопасности – выделение законодательного, административного, процедурного программно-технического уровней [5]. Законодательный уровень является важнейшим для обеспечения информационной безопасности. На законодательном уровне особого внимания заслуживают правовые акты и стандарты.

Главная задача мер административного уровня – сформировать программу работ в области информационной безопасности и обеспечить ее выполнение, выделяя необходимые ресурсы и контролируя состояние дел.

К процедурному уровню относятся меры безопасности, реализуемые людьми.

Программно-технический уровень направлен на контроль компьютерных сущностей – оборудования, программ и/или данных, образуют последний и самый важный рубеж информационной безопасности.

В соответствии с нормами ГОСТ выделяются следующие уровни информационной безопасности: управление информационной безопасностью, организационно-административный, безопасность инфокоммуникационной структуры, безопасность услуг, сетевая безопасность, физическая безопасность [6]. Описанные уровни могут быть объединены в три укрупненных уровня: организационный, организационно-технический, технический [7].

В силу специфики разрабатываемой СЭОИБО, ни одна из приведенных классификаций не является оптимальной, так как они не отражают особенностей систем информационной безопасности небольших организаций.

Обобщая существующие сведения, можно выделить следующие уровни информационной безопасности (рис. 1): Физический уровень, Сетевой уровень, Инфокоммуникационный уровень, объединяющий в себе программно-технические методы и средства защиты информации, процедурный уровень административный уровень – действия общего характера, предпринимаемые руководством организации, программу работ в области безопасности (политика безопасности) и обеспечение ее выполнения.

При экспертной оценке информационной безопасности целесообразно начинать с физического уровня, и далее продвигается до наиболее абстрактных уровней. Это необходимо, во-первых, в силу существующей во многих организациях ситуации халатного отношения к аппаратному обеспечению, а, во-вторых, реализация уязвимостей этого уровня может принести наибольший финансовый вред организации.

Последние три уровня (инфокоммуникационный, процедурный, административный) целесообразно рассматривать с точки зрения важных информационных активов организации. Это даст пользователям СЭОИБО уверенность в том, что предложенные экс-

пертной системой рекомендации помогут организации защитить наиболее ценную информацию и поможет учесть при экспертной оценке индивидуальные особенности каждой конкретной организации.

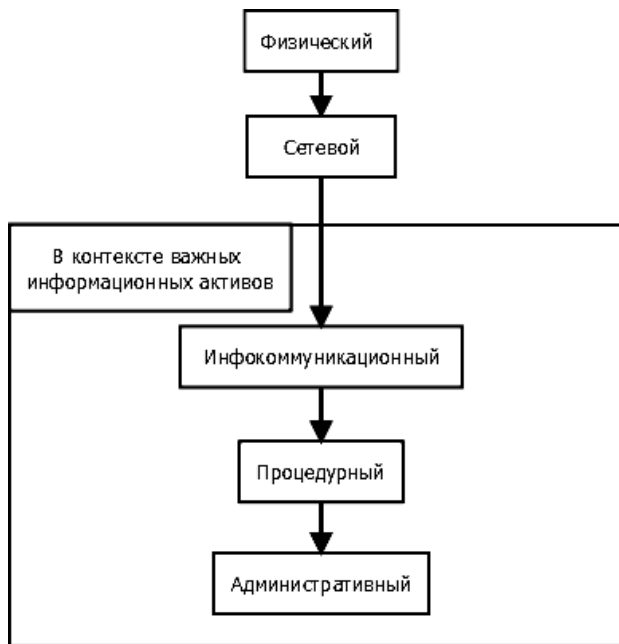


Рис. 1. Последовательность оценки информационной безопасности в системе

Проектирование функций системы СЭОИБО.

1. Формирование гибкого списка критериев оценки в соответствии с особенностями предприятия.

2. Формирование экспертных оценок информационной безопасности организаций. Формирование экспертных оценок производится при помощи сочетания четкой и нечеткой логики, за основу алгоритма взяты методики оценки соответствия СТО БР ИББС-1.2-2010 [8], комбинированный подход [9], NIST [10].

3. Ведение базы состояния информационной безопасности. По желанию пользователей может производиться сохранение введенных параметров оценки для ведения статистики и мониторинга изменений в будущем.

4. Формирование рекомендаций по улучшению информационной безопасности. Основа для подбора рекомендаций – стоимостная оценка реализации угроз ценным информационным активам организации. Данный показатель будет рассчитываться с использованием экспертных знаний и сведений об информационных активах, полученных от пользователей СЭОИБО.

Для оптимальной реализации описанных функций, система разделяется на 6 подсистем: доступа к базе данных, управления правами доступа, пользовательского интерфейса, управления критериями, генерации оценок, генерации рекомендаций.

Выделены основные варианты использования (use case) системы с точки зрения пользователя (рис. 2).

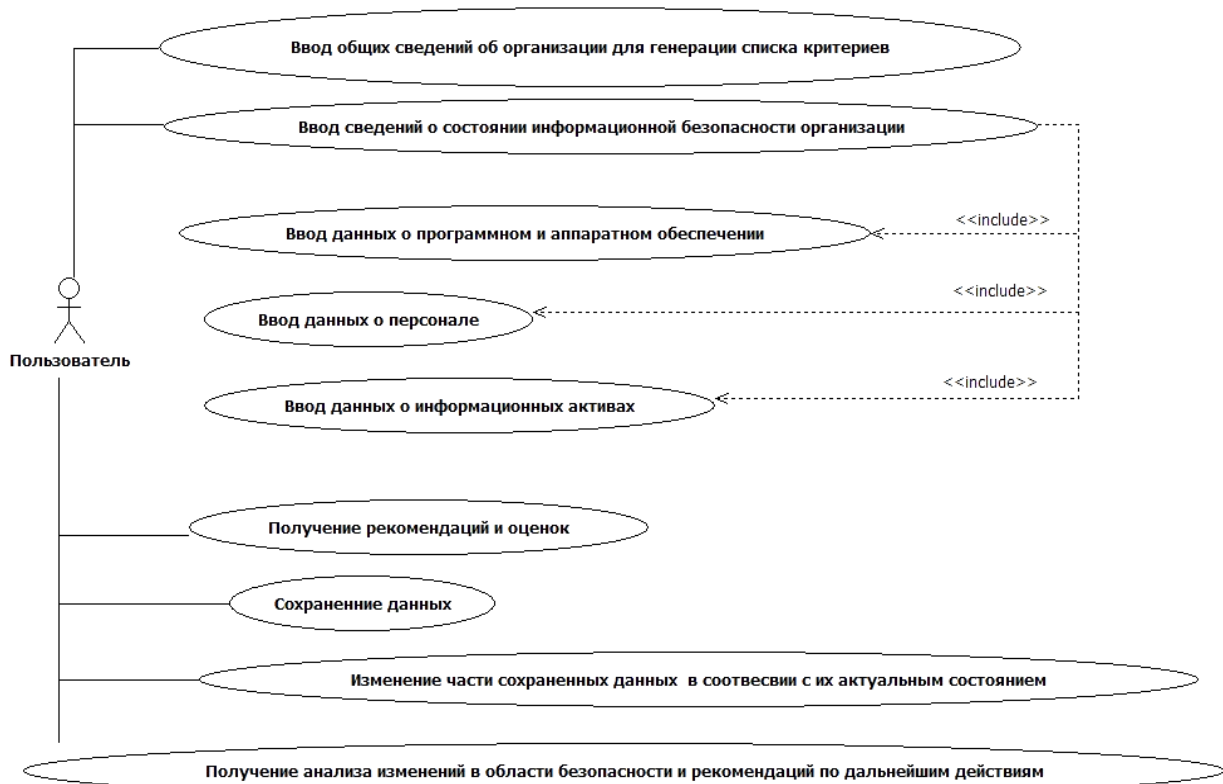


Рис. 2. Варианты использования экспертной системы

Прецеденты, включенные (include) прецедент «Ввод сведений о состоянии информационной безопасности организации» разделены по тематике вводимой информации. При применении системы в организациях за выполнение каждого прецедента должны отвечать различные сотрудники, так как каждый вариант использования требует специфической компетенции в определенных областях, знания реального положения дел организации в этой сфере.

Вариант использования «Ввод данных о программном и аппаратном обеспечении» объединяет в себе все технические аспекты защищенности информации. Это одна из важнейших сфер обеспечения информационной безопасности в организациях. Так в списке уязвимостей ГОСТ 13335–3 14 из них касаются аппаратного обеспечения, а 22 – программного [9].

В ходе проведенного исследования было выявлено, что архитектура Web-приложения, реализованная средствами системы управления базами данных Firebird и языка программирования PHP, является оптимальной для разрабатываемой системы.

Были выделены следующие уровни информационной безопасности, оцениваемые в системе: физический, инфокоммуникационный, процедурный административный уровень, анализируемые в контексте важных информационных активов организации. Также были спроектированы 4 основные функции СЭОИБО, 6 подсистем и варианты ее использования с пользовательской точки зрения.

Библиографические ссылки

1. Оптимизация настроек систем управления базами данных / С. Н. Ежеманская, И. В. Ковалев, А. В. Прокopenko, Р. Ю. Царев, Е. В. Гражданцев // Программные продукты и системы. 2008. № 2 (82). С. 54–56.
2. Царев, Р. Ю. Среда исполнения мультиверсионного программного обеспечения // Программные продукты и системы. 2007. № 2 (78). С. 29–30.
3. Русаков М. А., Царев Р. Ю. Методы повышения надежности программного обеспечения // В мире научных открытий. 2011. № 8 (20). С. 32–41.
4. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных (выписка) / Федеральная служба по техническому и экспортному контролю, 2008 [Электронный ресурс]. URL: <http://fstec.ru/normativnye-i-metodicheskie-dokumenty-tzi/114-deyatelnost/tekushchaya/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/normativnye-i-metodicheskie-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/379-bazovaya-model-ugroz-bezopasnosti-personalnykh-dannykh-pri-ikh-obrabotke-v-informatsionnykh-sistemakh-personalnykh-dannykh-vypiska-fstek-rossii-2008-god>. (дата обращения 14.05.2013).
5. Галатенко В. А. Информационная безопасность грани практического подхода [Электронный ресурс] // Корпоративные информационные системы : конф. М., 1999. URL: <http://www.citforum.ru/seminars/cis99/galat2.shtml>. (дата обращения 14.05.2013).

6. ГОСТ Р 52448–2005 «Защита информации. Обеспечение безопасности сетей электросвязи. Общие положения». М. : Издат. стандартов, 2005.

7. ГОСТ Р 53110–2008 «Система обеспечения информационной безопасности сети связи общего пользования». М. : Издат. стандартов, 2008.

8. Стандарт Банка России СТО БР ИББС-1.2–2010 «Обеспечение информационной безопасности организаций банковской системы Российской Федерации» // Вестник Банка России. 2010. № 36–37 (1205–1206).

9. ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335–3–2007 «Методы и средства обеспечения безопасности»: Методы менеджмента безопасности информационных технологий. М. : Издат. стандартов, 2007.

10. Руководство по управлению рисками для систем информационных технологий: рекомендации Национального института стандартов и технологий [Электронный ресурс] // Центр компетенции по электронному правительству при Американской торговой палате в России. М., 2003. 1999. URL: <http://egov-center.ru/sites/default/files/000077.pdf>. (дата обращения 14.05.2013).

References

1. Ezhemanskaya S. N., Kovalev I. V., Prokopenko A. V., Tsarev R. Yu., Grazhdantsev E. V. *Programmnye produkty i sistemy*. 2008, no. 2 (82), p. 54–56.
2. Tsarev R. Yu. *Programmnye produkty i sistemy*. 2007, no. 2 (78), p. 29–30.
3. Rusakov, M. A. *V mire nauchnykh otkrytiy*. 2011, no. 8 (20), p. 32–41.
4. *Bazovaya model' ugroz bezopasnosti personal'nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal'nykh dannykh (vypiska)* (The base model of security threats personal data during their processing within the information systems of personal data (extract)). Federal'naya sluzhba po tekhnicheskomu i eksportnomu kontrolyu, 2008, available at: <http://fstec.ru/normativnye-i-metodicheskie-dokumenty-tzi/114-deyatelnost/tekushchaya/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/normativnye-i-metodicheskie-dokumenty/spetsialnye-normativnye-dokumenty/379-bazovaya-model-ugroz-bezopasnosti-personalnykh-dannykh-pri-ikh-obrabotke-v-informatsionnykh-sistemakh-personalnykh-dannykh-vypiska-fstek-rossii-2008-god>.
5. Galatenko V. A. *Informatsionnaya bezopasnost' grani prakticheskogo podkhoda* (Information Security faces a practical approach). *Konferentsiya "Korporativnye informatsionnye sistemy"* (Conference on "Corporate Information Systems"), Moscow, 1999, available at: <http://www.citforum.ru/seminars/cis99/galat2.shtml>.
6. GOST R 52448–2005 "Zashchita informatsii. Obespechenie bezopasnosti setey elektrosvyazi. Obshchie polozheniya" (GOST R 52448–2005 "Information Security. Ensuring security of telecommunication networks. General provisions"). Moscow, IPK, 2005, 23 p.
7. GOST R 53110–2008 "Sistema obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti seti svyazi obshchego pol'zovaniya" (GOST R 53110–2008 "Information security system of of public communication network"). Moscow, IPK, 2008, 19 p.

8. *Vestnik Banka Rossii*. 2010, no. 36–37 (1205–1206).
9. GOST R ISO/MEK 13335-3-2007 “Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti”: *Metody menedzhmenta bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy* (GOST R ISO / IEC 13335-3-2007 “Methods and tools to ensure security”: *Methods for Management of Information Technology Security*). Moscow, IPK, 2007, 49 p.
10. *Rukovodstvo po upravleniyu riskami dlya sistem informatsionnykh tekhnologiy: Rekomendatsii Natsional'nogo instituta standartov i tekhnologiy* (Risk Management Guide for Information Technology Systems: Recommendations of the National Institute of Standards and Technology). Moscow, 2003, available at: <http://egov-center.ru/sites/default/files/000077.pdf>. (14.05.2013)

© Антамошкин О. А., Пузанова Г. А., Онтужев В. В., 2013

УДК 621.31:681.5

СТРУКТУРА WEB-СЕРВИСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ С СУЩЕСТВЕННЫМИ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ

К. В. Богданов, А. Н. Ловчиков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: 2519869@gmail.com, ivt_anlovch@sibsau.ru

Цель работы заключается в создании программного обеспечения, позволяющего проводить анализ и моделирование в системах с несколькими блоками, обладающими существенной нелинейностью, такими как электронные ключи, например. Сложность создания такой системы заключается в том, что существующие подходы к моделированию предполагают решение системы дифференциальных уравнений, при составлении которой вносятся искусственные ограничения, влияющие на поведение системы непосредственно в моменты переключений. Предлагаемый подход опирается на представление модели не как единой, описываемой одним набором ДУ, а как набора взаимодействующих между собой простых систем. Так как такое моделирование накладывает специфичные требования на оборудование, было выдвинуто предложение разработать данное ПО как систему, работающую в облаке.

Ключевые слова: нелинейные системы, моделирование, функциональные языки программирования, облачные сервисы.

STRUCTURE OF SIGNIFICANT NONLINEARITY ELECTRIC CIRCUITS OF THE WEB-SERVICE MODELING

K. V. Bogdanov, A. N. Lovchikov

Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia
E-mail: 2519869@gmail.com, ivt_anlovch@sibsau.ru

The objective of the work is the creation of such a software system which will help to analyze and model the systems with multiple blocks bearing the significant nonlinearity (as transistor keys, for example). The complicity of this work is in need of creation of the main system of differential equations for the system as a whole. Such systems of differential equation has some important restrictions that may affect the results of modeling, especially in bifurcation points. We offer a method that represents the system as a number of connected simple subsystems. Each of them has its own math model. This approach impose specific requirements on hardware, so we offer to use the cloud computing to solve this inconvenience.

Keywords: nonlinear systems, modeling, functional programming, cloud computing

Моделирование и анализ работы электронного оборудования – весьма сложная задача, для решения которой активно используется специализированное программное обеспечение – EDA-системы. Развитие таких систем идёт, по большей части, экстенсивным

путём, начиная от систем, созданных в 70-ых годах прошлого столетия. Как правило, улучшаются пользовательские интерфейсы, расширяются базы данных электронных компонент и т. п., в то время как основные вычислительные алгоритмы остаются прежними.

Чаще всего всё сводится к решению получившейся системы линейаризованных дифференциальных уравнений, являющейся математической моделью моделируемого устройства. Численные методы решения при этом позволяют получать весьма точные результаты, но проблемы возникают при моделировании систем с большим количеством электронных компонентов, что приводит к усложнению математической модели, и при моделировании систем, в которых имеются существенные нелинейности, которые значительно огрубляют результаты моделирования, либо вообще приводят к тому, что вычислительный процесс расходится.

В работах [1; 2] авторами был предложен альтернативный подход для моделирования подобных систем. Вместе с тем, стоит признать, что схемы, для которых требуется подобный подход в моделировании, весьма специфичны (как правило, это схемы с ШИМ). Следовательно, EDA-система для моделирования работы схем с существенными нелинейностями должна либо производить моделирование также всех остальных электронных схем на уровне аналогичного ПО, являющегося отраслевым стандартом де-факто, либо интегрироваться в процесс разработки. Так как первый путь является практически не реализуемым, то имеется смысл в создании узкоспециализированного ПО. Реализация данного ПО в виде Web-сервиса в сети Интернет позволит сделать доступ к нему наиболее лёгким для всех потенциальных пользователей.

Как было отмечено в [2], ядром данного сервиса становится моделирующий модуль, реализованный в виде виртуальной машины Erlang. Для обеспечения работы ядра, ему необходимо передать информацию об объекте моделирования в виде структуры взаимосвязей входов и выходов элементов схемы и сведений о типах самих элементов и их номиналах (рис. 1). В качестве формата, позволяющего описать данную информацию было принято решение использовать формат SPICE Netlist [3] из-за его широкой распространённости и простоты. Кроме того, пользователю представляется возможность в графическом виде изо-

бразить необходимую схему, которую также надо будет преобразовать в данный формат.

Учитывая многопользовательскую природу web-сервисов, системе необходимо иметь возможность проводить одновременно независимое моделирование нескольких десятков схем, т. е. запускать по одной виртуальной машине для каждого процесса моделирования. При этом вычислительная нагрузка может существенно варьироваться. Наиболее адекватным инфраструктурным решением для поддержания такой схемы работы, является размещение ядра в «облаке», т. к. ресурсы в этом случае будут выделяться по необходимости.

С учетом вышесказанного, архитектура web-сервиса состоит из следующих уровней:

1. Клиентский уровень – обеспечивает работу пользовательского интерфейса, отвечает за работу редактора схем и загрузку пользовательской информации в виде SPICE Netlist, осуществляет вывод результатов моделирования.
2. Уровень преобразования и контроля – осуществляет синтаксический и, отчасти, семантический контроль введенной информации, проверяет наличие моделей элементов, используемых пользователем в схеме, в базе ядра, осуществляет преобразование графического представления схемы в единый формат.
3. Библиотеки элементов – коллекции функций, реализующих отдельные электронные компоненты
4. Подсистема хранения – СУБД, реализующая хранение вводимой пользовательской информации и результатов расчета
5. Подсистема работы с облачным сервисом [4] – осуществляет запуск/останов счетных ядер, передаёт им исходные данные и получает результаты расчетов.
6. Виртуальные машины в облачном сервисе – осуществляют собственно моделирование.

Клиентский уровень реализован в виде т.н. «одностраничного» web-приложения, представляющего собой визуальный редактор принципиальных схем, работающий в во всех современных браузерах, с возможностью импорта схем в формате SPICE Netlist.

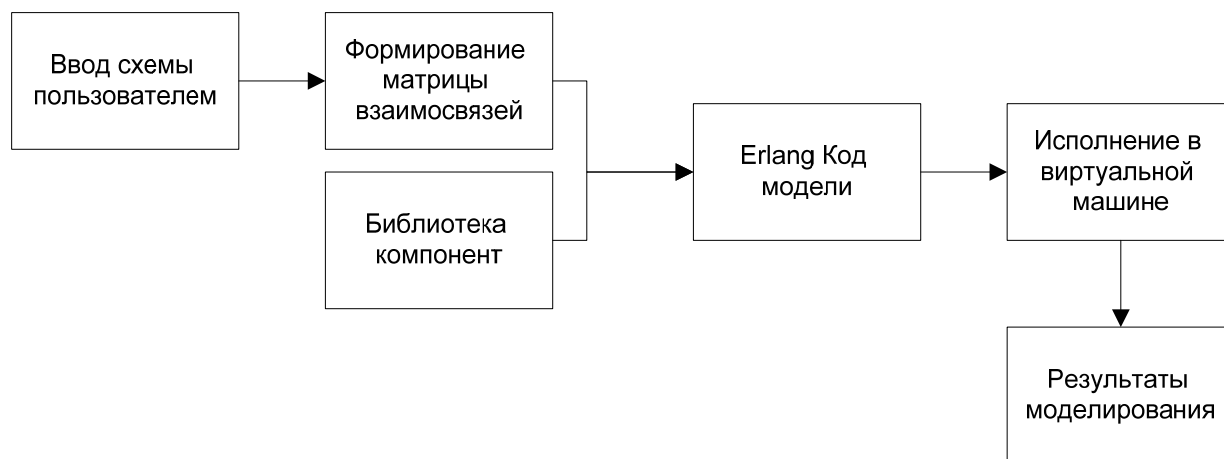


Рис. 1. Этапы процесса моделирования

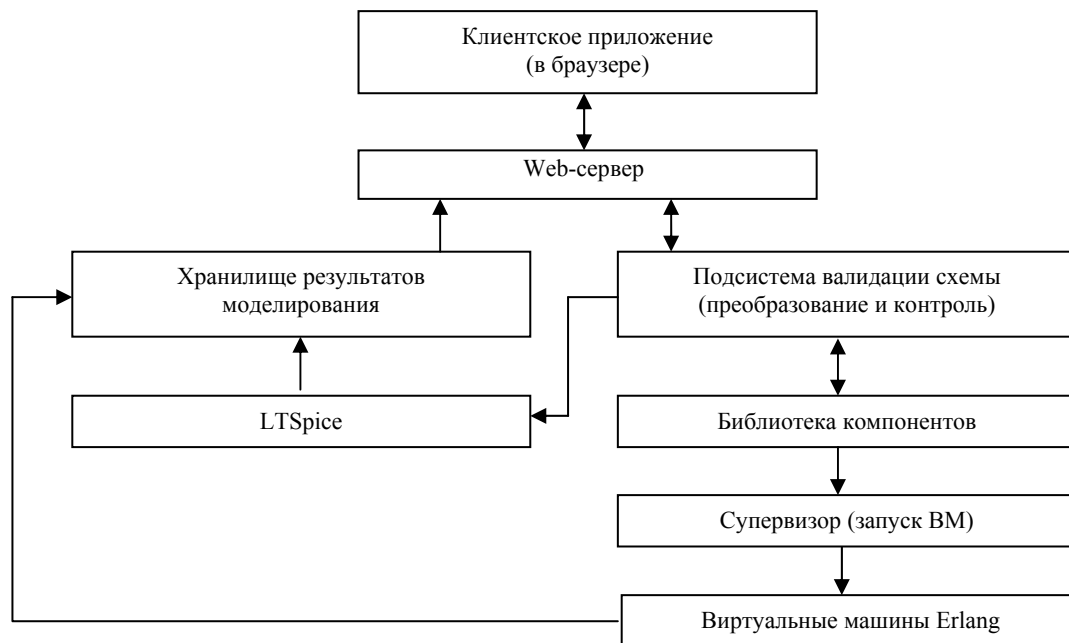


Рис. 2. Структура сервиса

Важным условием является необходимость наличия описанных элементов в библиотеке сервиса, иначе схема не сможет быть обработана. Если это условие выполняется, то приложение анализирует предоставленный файл, работая в тесной связи со вторым уровнем, и строит на его основе графическое представление принципиальной схемы, которое в дальнейшем может быть отредактировано стандартными визуальными методами. Обратный экспорт в формат SPICE Netlist не осуществляется (хотя принципиально возможен).

Получаемый файл описания схемы передаётся для моделирования серверной части, которая также анализирует параметры схемы, но уже на предмет наличия нелинейных компонентов. После чего, опираясь на результаты анализа, запускает либо обычный процесс моделирования путём вызова LTSpice (это происходит в том случае, если нелинейных компонентов не более 1), либо начинает создание отдельных процессов для каждого из компонентов схемы в виртуальной машине Erlang.

Для функционирования системы необходимо иметь несколько различных типов элементов:

1. Обычный процесс (передаточная функция, пример реализации приведён выше). Обеспечивает преобразование входного потока данных в выходной. В каждый момент синхронизации обязан принять и передать одну порцию (кортеж) данных.

2. Коммутатор. Обеспечивает перераспределение сигналов по нескольким выходным каналам в зависимости от соотношения количества входов и выходов. По сути является аналогом узла в электротехнике, но во избежание путаницы в терминологии, будем называть его коммутатором.

3. Источник. Обеспечивает выдачу сигналов. Входов не имеет.

4. Выход. Псевдоблок, необходимый для получения текущих значений параметров для анализа. Является адаптером между моделью и пользовательским интерфейсом. Имеет один вход, выходов нет.

Одной из важнейших процедур при создании подобной модели является построение таблицы маршрутизации по пользовательской модели (к примеру, по принципиальной электрической схеме). На основе этой информации также должны создаваться процессы-коммутаторы.

После запуска, все элементы начнут передавать сообщения маршрутизирующему процессу (серверу), который будет их распределять, опираясь на заданную топологию моделируемой системы.

Важнейшей функцией клиентского уровня также является визуализация результатов моделирования, которые возвращаются клиентскому браузеру в виде AJAX-ответа в формате JSON, а после могут быть визуализированы в виде двумерного графика, либо выгружены в формате CSV.

Наличие двух вариантов моделирования обусловлена тем фактом, что для схем, в которых не встречаются существенные нелинейности, моделирование с помощью виртуальной машины Erlang будет проходить медленнее, а, кроме того, будет использован относительно дорогостоящий облачный вычислительный ресурс. Кроме того, на данном этапе схема формирования набора вычислительных процессов находится на экспериментальном этапе, а возможность анализа пока ограничена только анализом переходных процессов.

Таким образом, данный web-сервис после расширения библиотеки доступных компонентов позволит проводить анализ схем с большим количеством нелинейных компонентов (таких, как, например ключи) любому пользователю, имеющему доступ к сети Интернет.

Основными преимуществами данного подхода в реализации этой системы являются:

1. Доступность – отсутствует необходимость в приобретении ПО и аппаратного обеспечения соответствующей мощности.
2. Масштабируемость – вне зависимости от сложности моделируемой схемы, будет выделено необходимое количество ресурсов (при условии размещения в облачном хостинге).
3. Оперативность – возможность выполнения моделирования в любой момент.

Библиографический список

1. Богданов К. В., Ловчиков А. Н. Построение EDA-системы на основе синхронизированных параллельных процессов // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). Красноярск. С. 58–61.
2. Богданов К. В., Ловчиков А. Н. Архитектура EDA-системы на основе конкурирующих параллельных процессов // Известия вузов: Приборостроение. 2011. № 4. С. 63–67.
3. Хайнеман Р. PSPICE. Моделирование работы электронных схем. М. : ДМК Пресс, 2005.
4. Риз Д., Облачные вычисления. СПб. : БХВ-Петербург, 2011.
5. Чезарини Ф., Томпсон С. Программирование в Erlang. 2012.

6. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.

7. Численные методы, параллельные вычисления и информационные технологии : сб. научн. тр. / под ред. В. В. Воеводина, Е. Е. Тыртышников. М. : Изд-во Москов. ун-та, 2008.

References

1. Bogdanov K. V., Lovchikov A. N. Vestnik SibGAU. 2009, № 4(25), p. 58–61.
2. Bogdanov K. V., Lovchikov A. N. Izvestiya vuzov: Priborostroyeniye. 2011, № 4, p. 63–67.
3. Hineman R. PSPICE. Electronically schemes modeling. DMK. Moscow, 2005, 336p.
4. Riz D. Cloud computing. BHV, St-Petersburg, 2011, 288 p.
5. Chezarini F., Thompson S. Erlang programming. 2012, 488 p.
6. Norenkov I. P. CAD basics // MGTU, Moscow, 2002, 336 p.
7. Numerical methods, parallel computing and information technologies: scientific works compilation. Under redaction V. Voevodin, E. Tyrtshnikov, MGU, Moscow, 2008, 320 p.

© Богданов К. В., Ловчиков А. Н., 2013

УДК 681.5:517.551

К ВОПРОСУ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*

А. В. Большавичус¹, И. В. Ковалев², В. В. Лосев¹

¹Сибирский государственный технологический университет
Россия, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82. E-mail: bolsavichus@gmail.com

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. имени газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: rector@sibsau.ru

Предложен подход к построению динамической модели объекта системы автоматического регулирования путем идентификации функции объекта и анализа его нелинейных характеристик, с последующим изучением численных характеристик полученных случайных величин. Применены прикладные программные средства, обеспечивающие автоматизацию задач исследования на основе достоверных методов (Гаусса-Ньютона). В итоге обеспечена возможность оценки степени достоверности используемой передаточной функции в задаче функциональной аппроксимации нелинейных характеристик объекта, а также получены количественные значения показателя проявления статической характеристики из временного ряда полной продолжительности.

Ключевые слова: технологический процесс, объект, передаточная функция, случайная величина, математическое ожидание, аппроксимация.

*При поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания, проект № 8.5534.2011 «Модели, методы и алгоритмы синтеза и управления развитием отказоустойчивых программных архитектур распределенных информационно-телекоммуникационных систем».

TO THE QUESTION OF THE FUNCTIONAL APPROXIMATION OF NONLINEAR CHARACTERISTICS OF THE OBJECTS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF THE CONTINUOUS TECHNOLOGICAL PROCESSES

A. V. Bolsavichus¹, I. V. Kovalev², V. V. Losev³

¹Siberian State Technological University

82 Mira prosp., Krasnoyarsk, 660049, Russia. E-mail: bolsavichus@gmail.com

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia

E-mail: rector@sibsau.ru

The authors suggest an approach to the dynamic model of an object of automatic control system by identification of the object function and analysis of its nonlinear characteristics with the following study of the numerical characteristics of the obtained random values. The applied software tools provide for automation of the tasks for research on the basis of reliable methods (of Gauss-Newton). As a result it is possible to assess the reliability extend of the used transfer function at the task of the functional approximation for nonlinear characteristics of the object and to obtain quantitative values of the indicator that displays static characteristic from the time series of the full duration.

Keywords: technological process, object, transfer function, random values, expected value, approximation.

В условиях непрерывного технологического процесса (ТП) сложных динамических систем, режимы работы которых сопряжены с постоянным изменением регулируемых параметров, не представляется возможным получить экспериментально статическую характеристику объекта системы автоматического регулирования (САР). Однако задача повышения качества регулирования, улучшения характеристик переходных процессов, в том числе уменьшения перерегулирования, и в целом, снижения избыточного энергопотребления на собственные нужды, требует построения динамической модели, способной отразить вполне достоверно технологический объект управления. Наличие априорной информации, в настоящем случае входных и выходных нелинейных характеристик объекта, позволяет ускорить процесс идентификации объекта, точнее, получение его абстракции, выраженной передаточной функцией, с высокой степенью достоверности. Обращаясь к прикладным программным средствам, в частности, System Identification Toolbox пакета Matlab [1], проанализируем имеющуюся априорную информацию для объекта (рис. 1), выполняющего функцию поверхностного теплообмена.

Априорная информация представлена как входной характеристикой объекта – изменение температуры теплового агента подающего трубопровода (C^0) по времени, так и выходной характеристикой – изменение температуры теплового агента обратного трубопровода (C^0) по времени. Продолжительность временного ряда 502 200 секунд.

Анализ временных рядов основан на чередовании передаточных функций с переменным количеством полюсов и последующим отысканием оптимальных значений коэффициентов преобразования K_p и постоянной времени T_p методом Гаусса-Ньютона, итерационным численным методом нахождения решения задачи наименьших квадратов [2], средствами System

Identification Toolbox, при которых апостериорная выходная характеристика максимально будет приближена к априорной выходной характеристике посредством метода функциональной аппроксимации [3; 4].

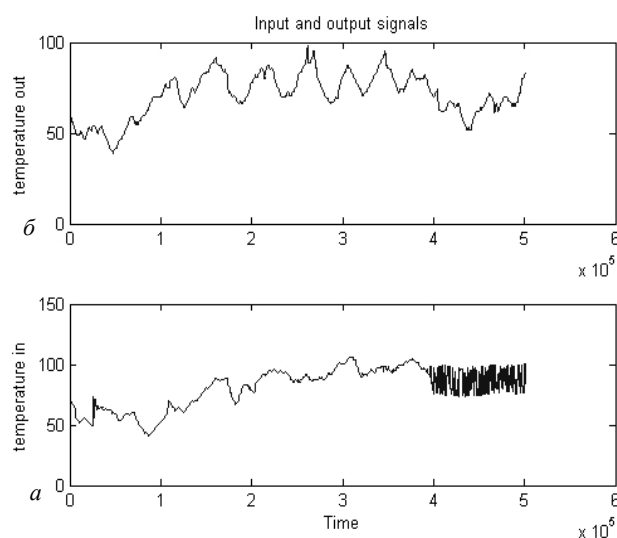


Рис. 1. Нелинейные характеристики объекта:
а – входная; б – выходная

Анализ временных рядов полной продолжительности при чередовании передаточных функций с переменным количеством полюсов показал, что с увеличением количества полюсов передаточной функции степень достоверности кривых – F возрастает (рис. 2), однако достигнутый максимум составляет $F = 36,04 \%$ (табл. 1).

Исходные знания об объекте позволяют судить о том, что процесс поверхностного теплообмена весьма инерционный по своей природе, следовательно, переходный процесс из одного устойчивого состояния в другое, в рамках статической характеристики, также

является продолжительным по времени. Таким образом, задача повышения степени достоверности кривых основана на выделении статической характеристики из временного ряда полной продолжительности.

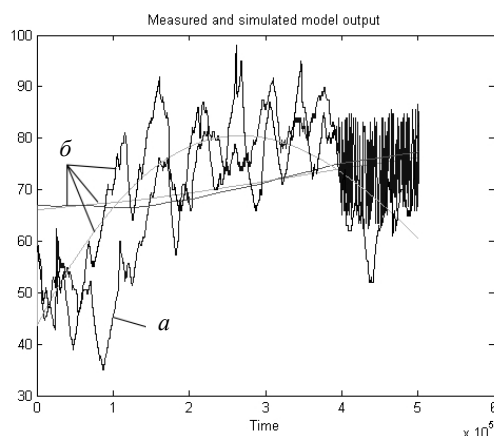


Рис. 2. Выходные характеристики объекта: *a* – исходная (априорная); *b* – апостериорные

Не принимая во внимание конструктивные особенности объекта, значение температуры наружного воздуха и температуры внутри помещения, проведем исследование участков временных рядов с переменным количеством точек опроса путем разделения и последующего анализа исходных временных рядов полной продолжительности. Данный подход также позволит проанализировать численные характеристики полученных случайных величин при условии достаточного количества участков временных рядов.

Первым шагом является выделение трех участков ($N = 3$) из исходных временных рядов полной продолжительности. Введем понятие условной вероятности P_i – вес определенной структуры передаточной функции в решении задачи аппроксимации кривых – N участков временных рядов, где i – количество полюсов передаточной функции. Полученные результаты (табл. 2), в том числе условная вероятность $P_1 = 0,67$ и $P_3 = 0,33$, не позволяют сделать однозначный

вывод о функциональной зависимости между такими параметрами как N , P_i и F , а также о характере закономерности между P_i и F при переменном N . Отметим, что при $N = 3$, передаточной функции меньшего веса (P_3) соответствует большая степень достоверности кривых $F = 65,28 \%$. Для получения ответов на поставленные вопросы продолжим анализ участков временных рядов полной продолжительности при $N = 10, 20, 40$. По мере увеличения количества участков ($N = 10, 20, 40$) при разделении исходных временных рядов полной продолжительности и их последующего анализа получены следующие результаты – табл. 3–5, а также численные характеристики степени достоверности F , как дискретной случайной величины.

Настоящие результаты позволяют наблюдать проявление следующей закономерности: в задаче аппроксимации участков кривых превалирует вес передаточной функции с большим количеством полюсов и по мере увеличения количества участков ($N = 10, 20, 40$) степень достоверности кривых возрастает. При этом характер данной закономерности в рамках настоящего исследования не определен, однако полученные характеристики могут быть представлены в следующей функциональной зависимости:

$$M_N(F) = \sum_{j=1}^i F_i \cdot P_i, \quad (1)$$

Выражение (1) есть математическое ожидание [5] степени достоверности F в решении задачи аппроксимации участков N посредством передаточных функций с различным количеством полюсов i и условными вероятностями P_i .

Интересным результатом в ходе анализа временных рядов является передаточная функция (2) с количеством полюсов $i = 3$, степенью достоверности $F = 92,59 \%$ и математическим ожиданием $M_N(F) = 73,74\%$:

$$G(s) = \frac{132,85}{(1 + 5085,5 \cdot s)(1 + 2822,1 \cdot s) \times (1 + 1.8351 \cdot e \cdot 7 \cdot s)} \quad (2)$$

Таблица 1

Результаты анализа временных рядов полной продолжительности ($N = 1$)

Кол-во точек опроса	Кол-во полюсов функции, i	Степень достоверности F , %	Вид передаточной функции	Коэффициент преобразования (Kp), постоянная времени (Tr_i)
1000	0	0,8487	$G(s) = Kp$	$Kp = 0.85645$
	1	3,326	$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp_1 \cdot s}$	$Kp = 9.7479 \cdot 10^5$ $Tp_1 = 3.8744 \cdot 10^{12}$
	2	-0,7483	$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 \cdot s)(1 + Tp_2 \cdot s)}$	$Kp = 1.1288$ $Tp_1 = 9.9328$ $Tp_2 = 0.001$
	3	36,04	$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 \cdot s)(1 + Tp_2 \cdot s)(1 + Tp_3 \cdot s)}$	$Kp = -1.6904 \cdot 10^6$ $Tp_1 = 5.162 \cdot 10^{11}$ $Tp_2 = 3.3646 \cdot 10^5$ $Tp_3 = 0.0072673$

Таблица 2

Результаты анализа временных рядов с выделением трех участков ($N = 3$)

Номер участка, n	Кол-во полюсов функции, i	Степень достоверности F , %	Вид передаточной функции	Коэффициент преобразования (Kp), постоянная времени (Tr_i)
1	0	15,62	$G(s) = Kp$	$Kp = 1.0143$
	1	53,94	$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp_1 * s}$	$Kp = 2.9232 \cdot 10^9$ $Tp_1 = 6.7123 \cdot 10^{14}$
	2	64,19	$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)}$	$Kp = 1.3771 \cdot 10^7$ $Tp_1 = 2.2671 \cdot 10^{12}$ $Tp_2 = 20874$
	3	65,28	$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)(1 + Tp_3 * s)}$	$Kp = 1.6958$ $Tp_1 = 415.23$ $Tp_2 = 48912$ $Tp_3 = 48877$
2	0	-17,4	$G(s) = Kp$	$Kp = 0.85647$
	1	0,2478	$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp_1 * s}$	$Kp = 3755.5$ $Tp_1 = 3.2386 \cdot 10^{10}$
	2	-16,75	$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)}$	$Kp = 0.85558$ $Tp_1 = 133.83$ $Tp_2 = 133.86$
	3	-16,16	$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)(1 + Tp_3 * s)}$	$Kp = 0.85515$ $Tp_1 = 0.001$ $Tp_2 = 724.31$ $Tp_3 = 0.001$
3	0	11,24	$G(s) = Kp$	$Kp = 0.78145$
	1	39,89	$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp_1 * s}$	$Kp = 0.75835$ $Tp_1 = 13616$
	2	39,26	$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)}$	$Kp = 0.7676$ $Tp_1 = 0.001$ $Tp_2 = 8885.3$
	3	29,98	$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)(1 + Tp_3 * s)}$	$Kp = 0.71991$ $Tp_1 = 1588$ $Tp_2 = 39273$ $Tp_3 = 39268$

Таблица 3

Результаты анализа временных рядов с выделением 10 участков ($N = 10$), количеством точек опроса – 100

Кол-во полюсов функции, i	Условная вероятность, P_i	Степень достоверности F , % (среднее)	Математическое ожидание $M_N(F)$, %	Вид передаточной функции
0	0,1	-6,745	37,09	$G(s) = Kp$
1	0	0		$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp_1 * s}$
2	0,1	29,09		$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)}$
3	0,8	43,57		$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)(1 + Tp_3 * s)}$

Таблица 4

Результаты анализа временных рядов с выделением 20 участков ($N = 20$), количеством точек опроса – 50

Кол-во полюсов функции, i	Условная вероятность, P_i	Степень достоверности F , % (среднее)	Математическое ожидание $M_N(F)$, %	Вид передаточной функции
0	0	0	60,37	$G(s) = Kp$
1	0,1	68,17		$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp_1 * s}$
2	0,4	52,74		$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)}$
3	0,5	64,9		$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)(1 + Tp_3 * s)}$

Таблица 5

Результаты анализа временных рядов с выделением 40 участков ($N = 40$), количеством точек опроса – 25

Кол-во полюсов функции, i	Условная вероятность, P_i	Степень достоверности F , % (среднее)	Математическое ожидание $M_N(F)$, %	Вид передаточной функции
0	0	0	73,74	$G(s) = Kp$
1	0,05	67,84		$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp_1 * s}$
2	0,225	77,88		$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)}$
3	0,725	72,87		$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp_1 * s)(1 + Tp_2 * s)(1 + Tp_3 * s)}$

Полученное выражение (2) с максимальной степенью достоверности определяет функцию поверхностного теплообмена на одном из $N = 40$ участков ($n = 32$) и не позволяет описать прочие 39 участков с подобной достоверностью, однако, условная вероятность, для данного типа передаточной функции – P_3 составляет 0,725, что говорит о максимальном весе передаточной функции данного типа в решении задачи аппроксимации кривых N участков.

Таким образом, повысить степень достоверности кривых можно, выполнив следующие шаги:

– выделение участков временных рядов с переменным количеством точек опроса;

– анализ участков временных рядов, чередованием передаточных функций, с переменным количеством полюсов i и последующим отысканием оптимальных значений коэффициентов преобразования Kp и постоянной времени Tp_i методом Гаусса-Ньютона;

– получение и последующий анализ численных характеристик степени достоверности F .

Допустимо предположить, что итоговым результатом данного подхода является величина математического ожидания степени достоверности – $M_N(F)$, физический смысл которой, в рамках настоящего исследования, может быть интерпретирован в виде показателя проявления статической характеристики из временного ряда полной продолжительности, выраженной в процентном отношении, в решении задачи аппроксимации кривых чередованием четырех передаточных функций при переменном N .

Результаты, полученные в рамках настоящего исследования, а именно методологические аспекты идентификации объекта САР в условиях непрерывного ТП, могут быть применены в качестве одного из подходов при оценке степени достоверности передаточной функции в решении задачи аппроксимации кривых.

Библиографические ссылки

1. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. М. : СОЛОН-Пресс, 2005.
2. Ермаков С. М. Математическая теория планирования эксперимента. М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983.
3. Павлов В. Н. Межотраслевые системы: математические модели и методы. Новосибирск : Наука. Сибирские отделение, 1986.
4. Шишмарев В. Ю. Основы автоматического управления : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М. : Академия, 2008.
5. Ивановский Р. И. Теория вероятностей и математическая статистика. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. СПб. : БХВ-Петербург, 2008.

References

1. D'yakonov V. P. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii (in mathematics and modeling). Moscow, SOLON-Publ., 2005 – 576 p.

2. Ermakov S. M. *Matematicheskaya teoriya planirovaniya eksperimenta* (The mathematical theory of experiment planning). Moscow, Nauka, GRFML, 1983, 392 p.

3. Pavlov V. N. *Mezhotraslevye sistemy: matematicheskie modeli i metody* (Cross-industry systems: mathematical models and methods.). Novosibirsk: Nauka, SO, 1986, 218 p.

4. Shishmarev V. Yu. *Osnovy avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie dlya studentov vysshikh*

uchebnykh zavedeniy (Fundamentals of automatic control: a textbook for university students). Moscow. Akademiya Publ, 2008, 352 p.

5. Ivanovskiy R. I. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. Osnovy, prikladnye aspekty s primerami i zadachami v srede Mathcad* (Probability theory and mathematical statistics. Fundamentals, applications with examples and problems in Mathcad). Saint Petersburg: BHV-Petersburg Publ., 2008, 528 p.

© Больсявичус А. В., Ковалев И. В., Лосев В. В., 2013

УДК 520.2

НОВЫЕ СВЕТОСИЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ – АПОХРОМАТЫ ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С. А. Веселков, Е. Г. Лапухин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. имени газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: slovoktk@mail.ru, pulsar1963@yandex.ru

Отечественная стекловаренная промышленность добилась значительных успехов в деле разработки новых оптических материалов, в частности особых стекол с малой дисперсией. Именно благодаря таким материалам снова проявился интерес к линзовым оптическим системам со значительно уменьшенным вторичным спектром – так называемым апохроматам. Используя специальную оптимизирующую программу расчета хода лучей, авторы численными методами исследовали значительное количество вариантов объективов – апохроматов, которые могут использоваться в астрономических исследованиях. Рассчитано несколько новых перспективных объективов – апохроматов с исправленным вторичным спектром из особых стекол, что позволило поднять светосилу и качество исправления аберраций.

Ключевые слова: оптическая система, аберрационный расчет, астрономические наблюдения.

NEW APERTURE LENS AS APOCHROMATS FOR ASTRONOMICAL RESEARCH

S. A. Veselkov, E. G. Lapukhin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia.
E-mail: slovoktk@mail.ru, pulsar1963@yandex.ru

The domestic glass melting industry has made significant progress in the development of new optical materials, in particular the special low-dispersion glass. Thanks to these materials, we can observe the increased interest to the optical lens system with significantly reduced secondary spectrum, the so-called apochromats. Using a special optimization program of ray-tracing, the authors investigated a numerically significant number of lens options – apochromats that can be used in astronomical research. The authors calculated several promising new lenses – apochromats with the corrected secondary spectrum of special glasses that allowed to increase the aperture ratio and the quality of correction of aberrations.

Keywords: optical system, aberration calculation, astronomical observations.

Построенные в 18–19 вв. астрономические рефракторы, которые изготавливались из двух марок обычного оптического стекла (крон и флинт), обладают значительным вторичным спектром. В начале двадцатого века, после работ Аббе, на заводе Шотта появились новые марки стекол под названием «курц-

флинты» с помощью которых можно строить рефракторы с укороченным вторичным спектром [1].

Лыткаринский Завод Оптического Стекла разработал и выпускает новые стекла марок ОФ6 (особый флинт) и ОК4 (особый крон, по своим дисперсионным свойствам напоминает кристаллы флюорита). Именно

эти, пока еще, дорогие стекла были использованы при расчете новых светосильных апохроматов.

Известны объективы апохроматы, состоящие из нескольких линз выполненных из нескольких марок стекла, где вследствие большой величины фокусного расстояния астрономических линзовых объективов величина вторичного спектра становится значительной и заметно влияет на качество изображения. При больших относительных отверстиях объективов, предназначенных для астрофотографии, необходимо исправлять и сферохроматическую aberrацию, действие которой аналогично действию вторичного спектра [1].

Применение особых стекол позволило рассчитать объективы диаметром до 250 мм и относительным отверстием до 1:3 с высоким качеством изображения. Расчет проводился в специальной оптимизирующей программе CODE V [2].

Все рассчитанные объективы содержат шесть линз – трехлинзовый объектив и трехлинзовый корректор поля. Это позволило безупречно устранить сферическую aberrацию, астигматизм и кривизну поля. Дисторсия практически равна нулю. Единственной недоисправленной aberrацией является кома высших порядков. Оптическая схема рассчитанных апохроматов

приведена на рис. 1, где в объективе первая линза отделена значительным воздушным промежутком от остальных двух с целью лучшего исправления сферохроматической aberrации. Заднее рабочее расстояние объектива q имеет значительную величину, что очень удобно, так как позволяет использовать различное вспомогательное оборудование (колесо со светофильтрами, фокусер и прочее) [3].

В табл. 1–3 приведены конструктивные параметры систем, различных диаметров и относительных отверстий, где r – радиус кривизны оптической поверхности по ходу луча, d – толщина линзы или расстояние между оптическими элементами. В последней графе приведен материал линз. Расстояние от последней поверхности объектива до фокальной плоскости – q , приведено в последней строке второй графы таблицы.

Объективы, приведенные в табл. 1 и 2, дают близкое к дифракционному качество изображения по всему полю – $2\omega = 4,5$ градуса. Спектральный диапазон, для которого исправлялись хроматические aberrации $\lambda = 0,486-0,656$ мкм. Линейное поле изображений составляет 52 мм. Объектив № 3 имеет еще более высокое качество изображения, что позволяет использовать его в качестве визуальной оптической трубы. Все поверхности линз имеют сферическую форму.

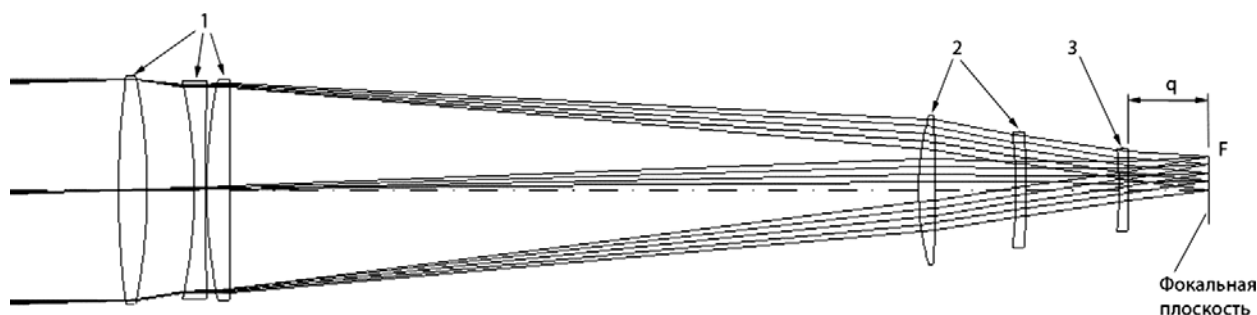


Рис. 1. Оптическая схема апохроматического объектива:

1 – трехлинзовый объектив; 2, 3 – трехлинзовый корректор поля; q – задний рабочий отрезок; F – фокальная плоскость

Таблица 1

Конструктивные данные для объектива диаметром 205 мм, f/3

r , мм	d , мм	Материал
615.4181	30.0000	OK4
-422.7848	30.5690	Воздух
-367.9253	8.4500	OF6
2198.4770	1.3000	Воздух
385.8102	22.0000	OK4
53403.0000	439.3716	Воздух
229.3745	15.0000	OK4
-755.6668	63.8822	Воздух
-315.3995	7.8000	OF6
-964.4873	113.9574	Воздух
-275.5883	6.5000	OF6
1037.5370	40.0000	Воздух

Таблица 2

Конструктивные данные для объектива диаметром 170 мм, f/4

r , мм	d , мм	Материал
668.2626	22.0000	ОК4
-453.7245	36.5955	Воздух
-392.6650	8.4500	OF6
2448.9851	1.3000	Воздух
427.7769	18.0000	ОК4
-7594.3498	532.7914	Воздух
212.3154	13.0000	ОК4
-1030.0242	62.5172	Воздух
-349.9245	7.8000	OF6
-603.6320	71.9943	Воздух
-278.2124	6.5000	OF6
526.9286	63.0000	Воздух

Таблица 3

Конструктивные данные для объектива диаметром 135 мм, f/5

r , мм	d , мм	Материал
656.5689	17.0000	ОК4
-453.9426	36.9528	Воздух
-391.7346	8.0000	OF6
2337.1405	1.0000	Воздух
427.2101	14.0000	ОК4
-7535.6494	534.6116	Воздух
207.5663	11.0000	ОК4
-1061.7002	62.9912	Воздух
-370.9875	7.0000	OF6
-675.6085	72.6170	Воздух
-262.6651	6.0000	OF6
558.9767	63.0000	Воздух

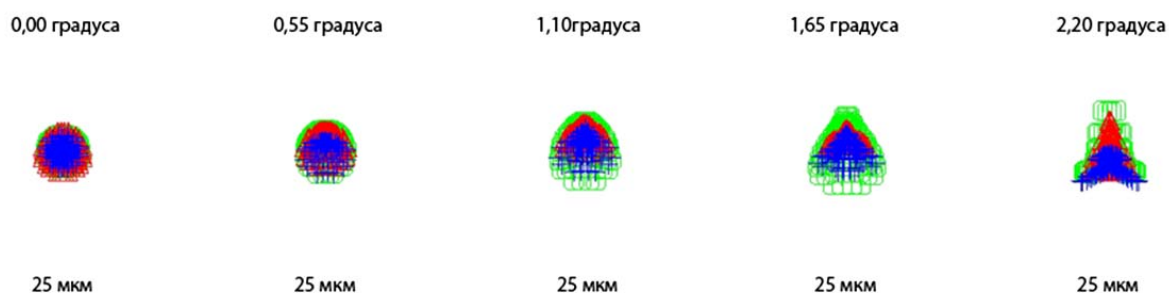


Рис. 2. Пятна рассеяния в фокальной плоскости апохроматического объектива в зависимости от угла поля зрения. Серые квадраты имеют размер 25×25 мкм

В качестве примера, для экономии места, приведем графики аберраций одного из рассчитанных объективов (табл. 2).

Диаметр = 170 мм, фокусное расстояние = 682 мм, относительное отверстие = 1:4, основная длина волны = 0,58 мкм, угловое поле зрения в пространстве предметов = 4,4 градуса, линейное поле зрения в пространстве изображений = 52,5 мм.

На рис. 2 приведены точечные диаграммы пятен рассеяния для пяти углов поля зрения. Среднеквадратичный размер пятен рассеяния составляет 2,6 мкм на оси и 3,5 мкм для угла 2,2 градуса.

Диаметр кружка Эри составляет 4 мкм. Полный размер пятен рассеяния можно определить на рис. 3, где представлена зависимость размера пятна рассеяния от количества энергии собранного объективом в пятне. 100 % энергии попадает в пятно размером 4,3 мкм в центре и 8,5 мкм на краю поля зрения.

Рис. 4 содержит графики сферической аберрации, астигматизма и дисторсии в %. Видно, что продольная сферическая (а также и сферохроматическая) аберрации малы, астигматизм исправлен очень хорошо, а дисторсия вообще практически равна нулю.

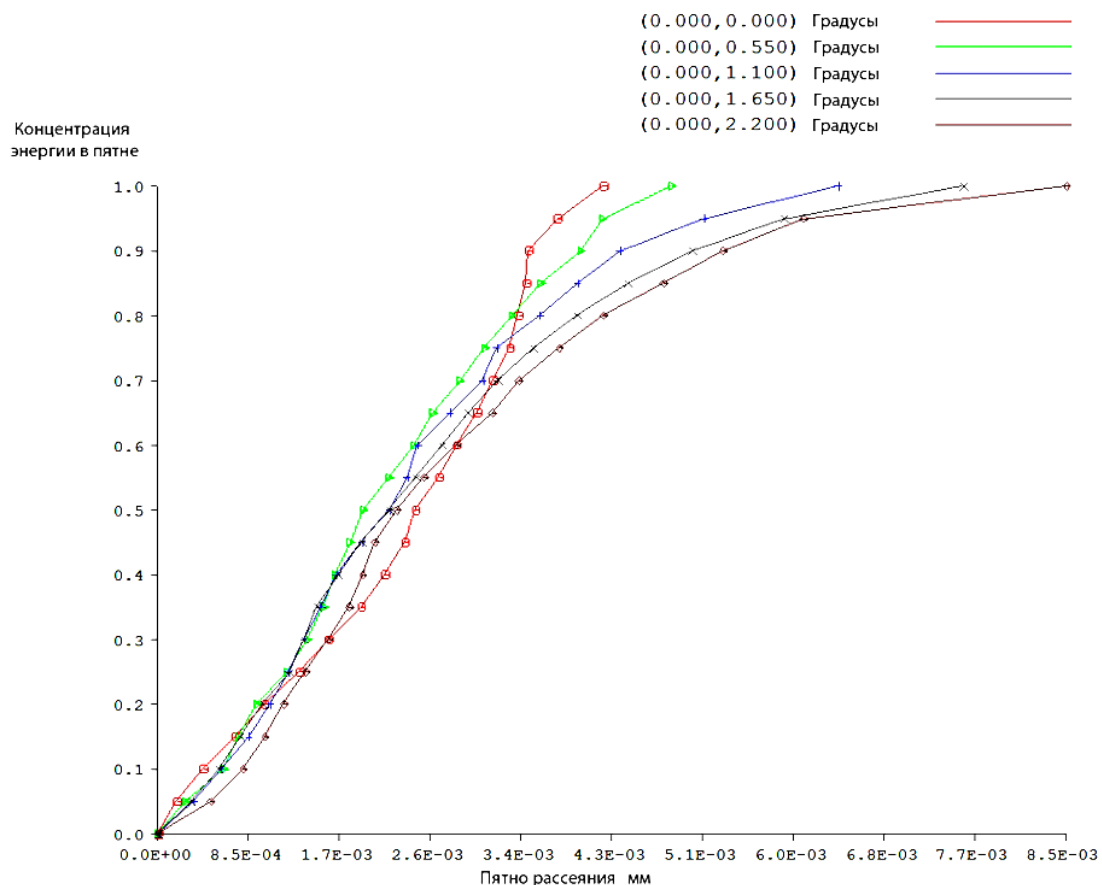


Рис. 3. Графики концентрации световой энергии в пятне рассеяния в фокальной плоскости апохроматического объектива

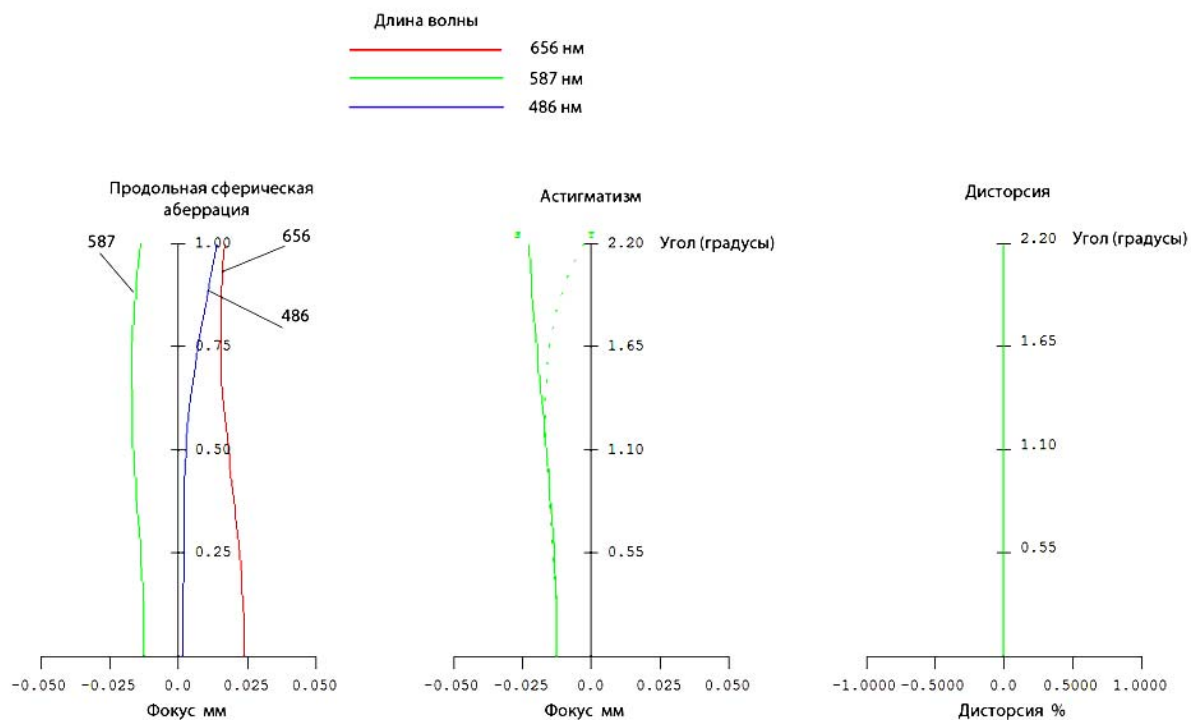


Рис. 4. Графики продольной сферической абберации, астигматизма и дисторсии

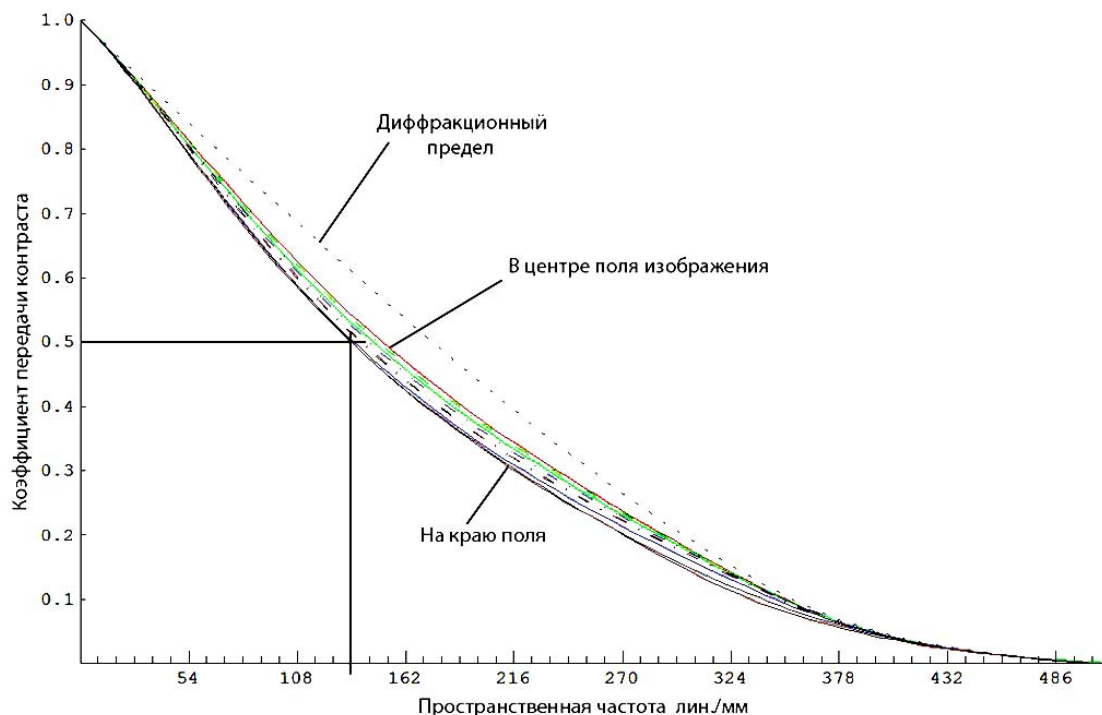


Рис. 5. График частотно-контрастной характеристики объектива при действующем отверстии 170 мм (относительное отверстие 1:4)

На рис. 5 показаны графики частотно-контрастной характеристики предлагаемого объектива, из которых видно, что по уровню контраста 0,5 объектив имеет разрешающую способность 135 лин./мм на краю поля и 150 лин./мм в центре. Это очень высокие значения.

Рассчитанные апохроматические объективы могут быть применены для фотографирования звездного неба с использованием современных ПЗС-матриц с большим размером чипа и малым размером пикселя, например для поиска переменных звезд [4; 5] или визуального наблюдения при помощи окуляров. Наилучшая область применения предлагаемых объективов — производство астрономических телескопов до 250 мм диаметром, высокой светосилы и большого поля изображения.

Библиографические ссылки

1. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. М. : Машиностроение, 1975.
2. Перспективные телескопы для проекта загородной астрономической обсерватории СибГАУ / С. А. Веселков, Е. Г. Лапухин, А. Г. Михайличенко и др. // Вестник СибГАУ. 2011. № 1 (34). С. 88–91.

3. Веселков С. А. Оптическая система высокого разрешения для получения снимков земли из космоса // Вестник СибГАУ. 2009. № 3 (24). С. 49–52.

4. Four New Variable Stars in Ursa Major / S. A. Veselkov, E. G. Lapukhin [et al.] // *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*. Vol. 11, No. 36 (2011). URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1252443>.

5. Veselkov S. A., Lapukhin E. G. New UV-type Variable Star in Lacerta // *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*. Vol. 12, N 3 (2012). URL: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1254808>.

References

1. Slusarev G. G. *Raschet opticheskikh system* (Calculation of optical systems). 1975. 639 p.
2. Veselkov S. A., Lapukhin E. G., Mihailichenko A. G., Fomin D. A., Bagenov P. A. *Vestnik SibGAU*. 2011, № 1 (34). p. 88–91.
3. Veselkov S. A. *Vestnik SibGAU*. 2009, № 3 (24), p. 49–52.
4. Veselkov S. A. et al. *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*, vol. 11, N 36 (2011), available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1252443>
5. Veselkov S. A. et al. *Peremennye Zvezdy, Prilozhenie*, vol. 12, N 3 (2012), available at: <http://www.astronet.ru/db/varstars/msg/1254808>.

© Веселков С. А., Лапухин Е. Г., 2013

УДК 621.396.67

ОЦЕНКА ВОЗМУЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ АНТЕНН

А. В. Гончарук¹, М. В. Лукьяненко², В. А. Раевский²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва,
Россия, 662970, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, 52
E-mail: gav78@iss-reshetnev.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнёва,
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. имени газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: info@sibsau.ru

Ставится задача построения системы наведения антенны, не влияющей на ориентацию и стабилизацию космического аппарата при выполнении основной функции. Рассматривается математическая модель системы наведения антенны, позволяющая моделировать динамические процессы, возникающие в ней. Проводится оценка возможных возмущающих моментов на основе математической модели системы наведения антенны космического аппарата. По результатам моделирования находятся максимальные амплитуды возмущающего момента и соответствующие им частоты. Определяется, что полученная величина возмущающих моментов не превышает допустимых значений во всей временной области. Показано, что результаты могут быть использованы для оценки динамических процессов на космическом аппарате в целом и оценки влияния на его точность ориентации в пространстве.

Ключевые слова: математическая модель, возмущающий момент, система наведения антенны.

EVALUATION OF THE DISTURBING MOMENT IN THE ANTENNA POINTING SYSTEM MOVEMENT SIMULATION

A. V. Goncharuk¹, M. V. Lukyanenko², V. A. Raevskiy²

¹JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev"
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662970, Russia
E-mail: gav78@iss-reshetnev.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia
E-mail: info@sibsau.ru

This article provides for the task of construction of the antenna pointing system, which does not influence the orientation and stabilization of the spacecraft. The mathematical model of the antenna pointing system, that can simulate the dynamic processes occurring in it, is presented. The evaluation of possible disturbing moments is made on the basis of a mathematical model of the spacecraft antenna pointing system. Simulation results of the disturbing moment maximum amplitudes and their corresponding frequencies are defined. It is determined that the found value of the disturbing moments do not exceed the allowable values in the whole time domain. It is shown that the results can be used to estimate the dynamic processes on the spacecraft as a whole and to assess the accuracy of its orientation in space.

Keywords: mathematical model, disturbing moments, antenna pointing system

Современные космические средства связи предъявляют всё более и более жесткие требования к функциональным возможностям предоставляемых услуг связи, её непрерывности и готовности, независимо от местонахождения потребителя и времени суток.

Данные функции реализуемы лишь при наличии возможностей оперативного и точного наведения антенн на наземные пункты, международную космическую станцию, космические аппараты, находящиеся на низкой и круговой орбите.

Этим обусловлен переход на использование крупногабаритных антенн и высоких связных частот, что приводит к чрезвычайно жестким требованиям к управлению наведением.

Ввиду жесткого лимита веса и объема космического аппарата созданные большие конструкции антенн являются гибкими в силу выбора легкого материала, а упаковка такой конструкции получается более плотной. Также большие космические конструкции имеют большое количество форм колебаний, которые обладают низкой частотой и близко расположены друг к другу.

В результате антенная система становится более сложным многомерным объектом управления, и это диктует новые требования к системам управления положением антенн.

Необходимость ограничения возмущающего момента на аппарат при соблюдении заявленной точности и скорости сопровождения объекта создала задачу построения системы наведения антенн, не влияющей на ориентацию и стабилизацию космического аппарата при выполнении основной функции.

Конструкция антенны, для управления которой проектировалась система наведения антенн, выполнена из 16 углепластиковых спиц, на которые натянуто радиоотражающее сетеполотно. Антенна в рабочем положении (рис. 1) установлена на штангу.

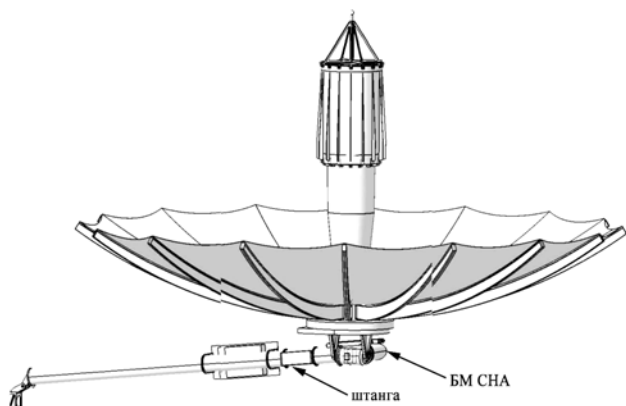


Рис. 1. Общий вид антенны в рабочем положении

На этапе создания системы наведения антенн было уделено внимание оценке возмущающего момента при математическом моделировании работы системы при управлении положением нежесткой антенной.

Моделирование даёт возможность увидеть, как будет вести себя система в действительности. Для получения реальной картины поведения системы была разработана математическая модель, которая учитывает воздействие факторов, оказывающих наибольшее влияние на работу системы.

Электромеханический модуль (ЭММ) блока механического системы наведения антенн (БМ СНА) моделируемой системы наведения антенны состоит из двух параллельных ветвей по пять ступеней, последняя ступень является волновой передачей, связанной с выходным валом. В данной модели представлена только одна из ветвей.

По результатам анализа структуры ЭММ БМ СНА разработана расчётная эквивалентная схема модели. Данная схема представлена в виде кинематической схемы, с учётом нежесткости и люфтов редуктора и упругости антенны, на рис. 2.

Все ступени редуктора содержат нелинейность типа люфт.

Математическая модель редуктора (рис. 2) с учётом нежесткости и люфтов представляет собой систему дифференциальных уравнений (2)–(11), представленных ниже.

В уравнениях обозначено:

J_1 – момент инерции вала синхронного двигателя с электромагнитной редукцией (СДЭР) и первой шестерни редуктора;

$A1, A2, A3$ – амплитуда тока в соответствующей фазе;

$CM1, CM2, CM3$ – коэффициенты момента СДЭР для соответствующей фазы;

θ_1 – угол поворота ротора СДЭР и первой шестерни редуктора;

$SIN(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t), SIN(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t + 120^\circ), SIN(2 \cdot \pi \cdot F \cdot t - 120^\circ)$ – синусоидальная форма тока в соответствующей фазе;

$SIN(2 \cdot \pi \cdot \theta_1 \cdot t), SIN(2 \cdot \pi \cdot \theta_1 \cdot t + 120^\circ), SIN(2 \cdot \pi \cdot \theta_1 \cdot t - 120^\circ)$ – синусоидальная форма момента СДЭР в соответствующей фазе;

$COF1, COF2$ – коэффициенты, учитывающие вторую и третью гармоники в форме момента СДЭР;

$PF1, PF2, PF3$ – погрешность сдвига фаз для соответствующей фазы СДЭР;

F – частота тока в фазах двигателя;

KD – коэффициент вязкого трения (коэффициент демпфирования) в СДЭР;

$MTP1$ – момент сухого трения на валу СДЭР;

K – коэффициент электромагнитной редукции СДЭР;

$\theta_2, v_1, \alpha, \beta_1, \beta_2, v_1, \gamma_1, \gamma_2, \rho$ – углы поворота соответствующих шестерён в редукторе (рис. 2);

μ – угол поворота антенны;

$J_2, J_3, J_4, J_5, J_6, J_7, J_8, J_9$ – моменты инерции соответствующих шестерён в редукторе (рис. 2);

J_{10} – момент инерции антенны (рис. 2);

$R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10$ – радиусы соответствующих шестерён в редукторе;

$C2, C3, C4, C6, C8$ – жесткости на кручение соответствующих осей в редукторе (рис. 2);

$C1, C5, C7$ – упругое сопротивление («твердость») зубцов (первой, четвертой и пятой ступеней редуктора) шестерён при соприкосновении зубцов после сборки люфта;

$C9$ – жесткость на кручение выходного вала, в месте крепления антенны к БМ, для моделирования первого тона упругих колебаний антенны;

$L1, L2, L3$ – люфты на первой, четвертой и пятой ступенях редуктора (рис. 2);

$KD2, KD4, KD6, KD8$ – коэффициенты вязкого трения при демпфировании упругих колебаний в редукторе;

$KD9$ – коэффициент вязкого трения при демпфировании упругих колебаний антенны;

$MTP2$ – момент сухого трения на последней (выходной) ступени редуктора;

DX, DY, DZ – относительное линейное перемещение зубьев шестерён соответствующих радиусов;

DXL, DYL, DZL – «проникновение» одного зуба в другой после того, как выберется люфт

$$DX = \theta_1 \cdot R1 + \theta_2 \cdot R2, \quad (1)$$

если $DX < 0$, то $DXL = DX + L1$, при этом, если $DXL \geq 0$, то $DXL = 0$,

если $DX \geq 0$, то $DXL = DX - L1$, при этом, если $DXL \leq 0$, то, $DXL = 0$ то есть люфт не выбран.

Передаточное число примененного редуктора

$$i_p = \frac{R2}{R1} \cdot \frac{R4}{R3} \cdot \frac{R6}{R5} \cdot \frac{R8}{R7} \cdot \frac{R10}{R9} = 10809.$$

С учетом параметров редуктора были определены собственные частоты колебаний ступеней редуктора с учётом нежесткости на кручение [1, с. 305]:

$$\omega = \sqrt{\frac{C_H}{J}} \quad (14)$$

102,6 Гц, 127,11 Гц, 103,4 Гц, 12,08 Гц, 20,4 Гц.

На основе проведенного модального анализа антенны в рабочем положении на штанге было получено значение частоты первого тона собственных колебаний антенны 0,83 Гц.

Максимально возможный момент инерции антенны составляет: $J_{10} = 50 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

При проектировании системы были задано следующее ограничение по работе системы: во всем диапазоне скоростей не должен создаваться возмущающий момент более 0,02 Н·м (200 гс·см), в диапазоне частот 0,1–1 Гц амплитуда периодической составляющей возмущающего момента должна быть не более 0,001 Н·м (10 гс·см).

Для оценки возмущающего момента, действующего на космический аппарат при работе системы наведения антенн, рассматривались несколько вариантов. Данные варианты приведены в таблице.

Возмущающий момент определяется как произведение углового ускорения на момент инерции нагрузки, приведённый к выходному валу ЭММ БМ СНА. То есть оценка возмущающего момента при движении БМ СНА производилась относительно места закрепления на элементе конструкции спутника.

По результатам проведенного моделирования движения антенны для оценки возмущающего момента от БМ СНА использовалась формула:

$$M_{\text{BM}} = J_H \frac{d\omega}{dt}. \quad (15)$$

Для построения амплитудно-частотных характеристик колебаний скорости и возмущающих моментов использовалась программная среда Matlab, функция fft [2, с. 138], реализующая алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Для оценки возмущающего момента, действующего на космический аппарат (в данном случае при работе СНА в режиме программного наведения), рассматривался диапазон частот 0,1–1 Гц. Для вариантов расчётов были получены частотные спектры возмущающего момента. По результатам анализа проведенных расчётов и полученных частотных спектров были определены максимальные амплитуды возмущающего момента и соответствующие им частоты, которые приведены в таблице.

Возмущающий момент немного более 0,02 Н·м (200 гс·см) присутствует в вариантах расчётов 7, 8, 10.

Проведённая оценка по результатам моделирования работы системы показала:

- величина полученных возмущающих моментов не превышает 0,02 Н·м в диапазоне частот 0,1–1,0 Гц во всей временной области;

- наблюдаемые возмущающие моменты не коррелируются с частотами управления, а определяются параметрами зубчатых пар редуктора и выходной ступени.

В результате проведенной работы была получена математическая модель системы наведения антенны, позволяющая моделировать динамические процессы, возникающие в ней, а так же производить оценку возможных возмущающих моментов, которые могут создаваться при её работе. Данные результаты могут быть использованы для оценки динамических процессов на космическом аппарате в целом и оценки влияния на его точность ориентации и ориентацию в пространстве антенны при наведении на наземные пункты, международную космическую станцию, космические аппараты, находящиеся на низкой и круговой орбите.

Максимальные амплитуды возмущающего момента и соответствующие им частоты

№ варианта	$\alpha_{\text{ЦУ}}, ^\circ$	$\dot{\alpha}_{\text{ЦУ}}, ^\circ/\text{с}$	Частота 1, Гц	Момент 1, Н×м	Частота 2, Гц	Момент 2, Н×м
1	50	0,2	0,409	0,0142	0,247	0,0104
2	50	0,5	0,1698	0,0184	0,3196	0,0135
3	50	–0,2	0,368	0,01	0,667	0,00856
4	50	–0,5	0,0499	0,0190	0,29	0,0143
5	150	0,2	0,4489	0,0133	0,92	0,0159
6	150	0,5	0,066	0,0191	0,332	0,0105
7	150	–0,2	0,227	0,0293	0,399	0,0194
8	150	–0,5	0,06	0,0223	0,238	0,0209
9	400	0	0,078	0,0104	0,306	0,0103
10	500	0,5	0,829	0,0388	0,889	0,0139
11	0	0,5	0,83	0,0213	0,76	0,0148
12	10	–0,5	0,648	0,0106	0,282	0,00856

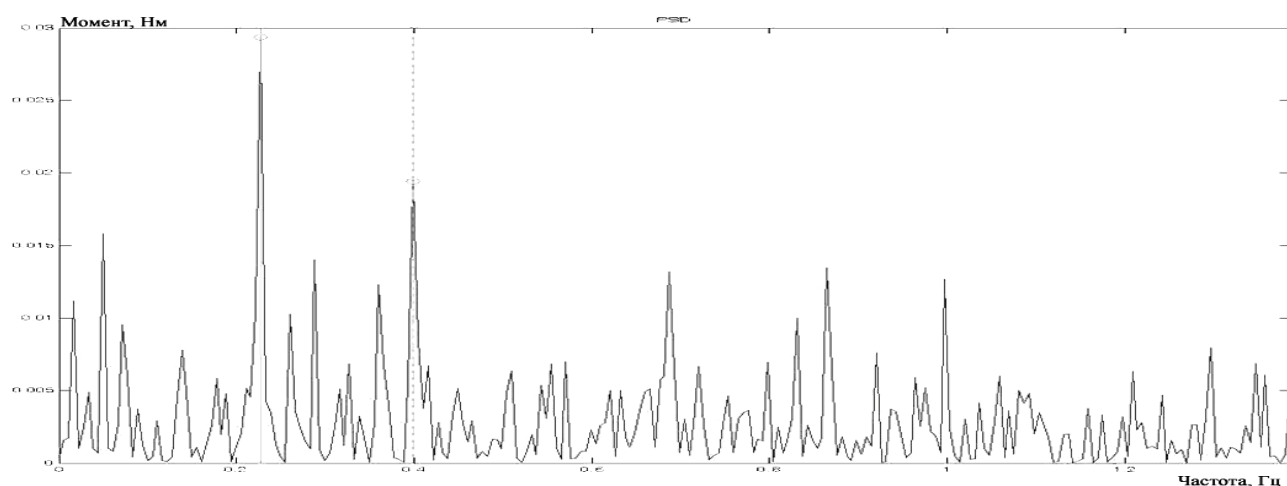


Рис. 3. Частотный спектр возмущающего момента на выходе редуктора (вариант 8)

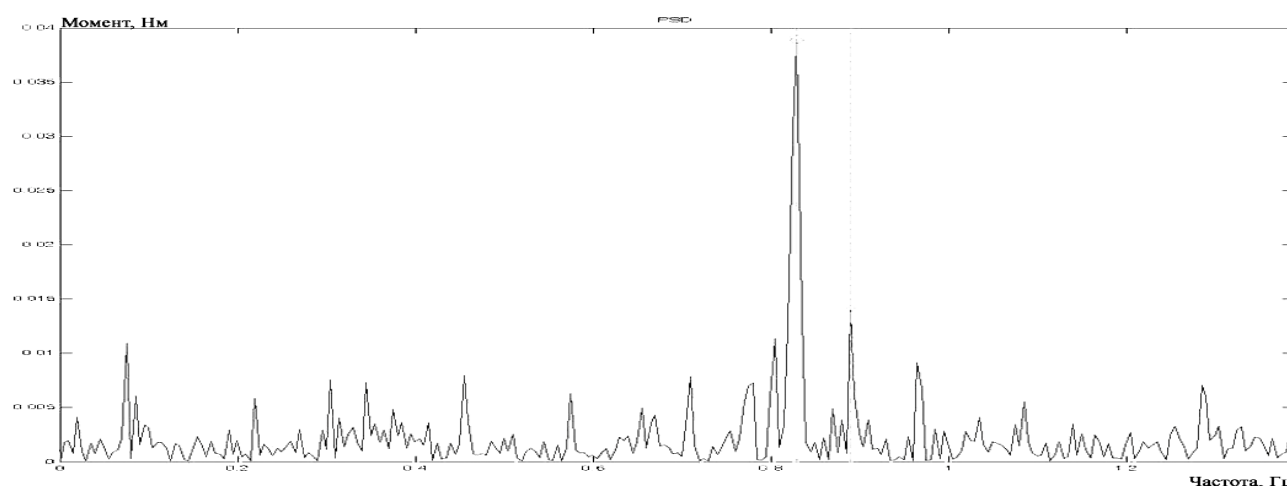


Рис. 4. Частотный спектр возмущающего момента на выходе редуктора (вариант 10)

Библиографические ссылки

1. Левитский Н. И. Колебания в механизмах : учеб. пособие для вузов. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 336 с.
2. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб. : Питер, 2002. 608 с.

References

1. Levitskiy N. I. *Kolebaniya v mekhanizmax, ucheb. posobiye dlya vtuzov* (Fluctuations in the mechanisms, a manual for technical universities). Moscow, Nauka, Chap. Ed. Sci. Lit., 1988. 336 p.
2. Dyakonov V. P., Abramenkova I. V. *MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazheniy. Spetsial'nyy spravochnik* (MATLAB. Signal and image processing. A special handbook). St.Petersburg, Peter, 2002. 608 p.

© Гончарук А. В., Лукьяненко М. В., Раевский В. А., 2013

УДК 621.314

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПОВЫШАЮЩЕГО ТИПА С РЕЗОНАНСНЫМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВКЛЮЧЕНИИ*

Н. Н. Горяшин, А. Н. Зорин, М. В. Лукьяненко, А. А. Соломатова

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

Рассмотрена проблема параллельной работы преобразователей напряжения (ПН) повышающего типа с переключением при нулевых значениях тока. В работе показано, что большое внутреннее сопротивление исследуемого ПН, определяемое параметрами резонансного контура (РК), позволяет выравнивать входные токи между параллельно работающими ячейками ПН без дополнительных контуров управления. Сформулированы критерии с использованием функций чувствительности по каждому параметру резонансного контура (РК) исследуемого преобразователя напряжения и управляющему параметру, которые позволяют определить границы выравнивания мощности между параллельно работающими ячейками ПН при стабилизации напряжения на выходной шине с заданным разбросом параметров РК и параметров импульсов, управляющих силовыми ключами. В подтверждение теоретическому анализу приведены результаты имитационного моделирования стабилизатора напряжения, построенного на базе двух ячеек ПН повышающего типа с переключением при нулевых значениях тока, в формате P-spice с разбросом параметров РК между ячейками.

Ключевые слова: повышающий преобразователь напряжения, резонансный преобразователь.

PARALLEL OPERATING OF ZCT STEP-UP BOOST CONVERTERS

N. N. Goryashin, A. N. Zorin, M. V. Lukyanenko, A. A. Solomatova

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

In the paper the problem of zero-current transition (ZCT) step-up boost converter parallel operating is considered. It is shown that high output resistance of the ZCT converter depends on resonant tank parameters and allows to iron out the input currents between converter cells without additional control loops. The criteria, which allow to define the range of input currents imbalance according to resonant tank parameters spread under ZCT converters parallel operating at output voltage regulation operation mode, are proposed. The criteria are based on sensitivity functions for each of resonant tank parameters and duty cycle of active switching transistor. To verify the theoretical analysis the paper presents P-spice simulation results of voltage regulator based on two step-up boost ZCT converters connected in parallel where resonant tank parameters spread between the corresponding elements.

Keywords: step-up boost converter, resonant converter.

Как известно, в системах электроснабжения (СЭС) космических аппаратов (КА) используются два типа первичных источников электроэнергии, которые имеют нестабильное выходное напряжение это аккумуляторная батарея (АБ) и солнечная батарея (СБ) [1–3]. Для обеспечения стабильного напряжения на выходной шине СЭС, питающей полезную нагрузку, необходимо энергопреобразующее стабилизирующее устройство. В качестве стабилизирующих регуляторов мощности СБ традиционно используются шунтовые стабилизаторы (ШС) напряжения короткозамыкающего типа, которые имеют минимальный набор компонентов, не требуют дросселей для сглаживания пульсаций входного и выходного токов, что обуславливает их высокие удельные характеристики

[3; 4]. Для обеспечения стабильного напряжения при питании аппаратуры КА на теновом участке орбиты, при дефиците энергии, получаемой от СБ, используется энергия, накопленная в АБ. В связи с тем, что напряжение на АБ в зависимости от степени заряженности может значительно меняться, в этом случае так же необходимо энергопреобразующее устройство, обеспечивающее стабилизацию выходного напряжения. При больших мощностях СЭС целесообразно переходить на повышенные значения напряжения стабилизированной выходной шины СЭС 100 В и более. В связи с этим чтобы обеспечить стабильное напряжение, например 100 В и длительный ресурс АБ, целесообразно использовать преобразователи электроэнергии повышающего типа.

*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».

Это позволит ограничить количество последовательно включенных аккумуляторов в батарее и тем самым уменьшить проблему разбалансировки между элементами АБ.

Как известно, блочно-модульный принцип построения автономных СЭС, состоящих из идентичных ячеек преобразователей электроэнергии, работающих на общую выходную шину питания, целесообразен с точки зрения обеспечения надежности СЭС в условиях длительной работы в необслуживаемом режиме, как например СЭС КА [1; 2]. В качестве энергопреобразующего устройства для стабилизации напряжения на шине СЭС при питании от АБ возможно использовать набор идентичных преобразователей напряжения (ПН) повышающего типа, включенных параллельно. Традиционно для организации равномерного распределения мощности между ячейками ПН применяются дополнительные контуры обратной связи по импульсному току ключевого элемента либо по среднему току для каждой ячейки ПН, как показано на рис. 1, где КЯ – коммутационная ячейка, СУ – схема управления, КУ – корректирующее устройство, обеспечивающее динамическую устойчивость стабилизатора напряжения в целом.

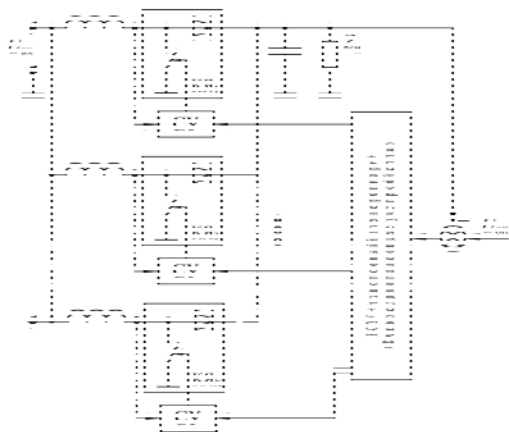


Рис. 1. Упрощенная схема многофазного импульсного стабилизатора напряжения с активным токовыравниванием между ячейками повышающего типа

В рассматриваемом далее варианте возможность обеспечения распределения токов между ячейками ПН предполагается осуществлять за счет свойств резонансного режима, используемого в преобразователях [5–7].

Возможность применения резонансных (квазирезонансных) преобразователей в СЭС КА обусловлена рядом преимуществ работы ключевого элемента (КЭ) в резонансном режиме по следующим характеристикам в сравнении с обычными импульсными преобразователями на ту же мощность, работающими с той же частотой коммутации: значительно меньшие потери на переключение; сниженные электромагнитные помехи; более низкие требования к элементам, особенно в отношении максимально-допустимых скоростей нарастания напряжений и токов; для организации резонансных процессов переключения могут

использоваться паразитные емкости и индуктивности; возможность параллельной работы на общую нагрузку без дополнительных средств по токовыравниванию. В настоящей работе исследуется последнее высказанное предположение, что использование резонансных режимов в параллельно работающих ПН позволяет распределить преобразуемую мощность между ячейками с приемлемой равномерностью без использования дополнительных контуров управления, как это реализовано при использовании традиционных импульсных ПН с «жестким» переключением с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Основанием к данному предположению является то, что часть преобразуемой энергии в ПН рассматриваемого типа за один период коммутации запасается в элементах резонансного контура (РК), причем запасаемая энергия слабо зависит от преобразуемой мощности при прочих фиксированных параметрах (входное и выходное напряжения, параметры РК). Таким образом, скорость расхода энергии, запасаемой в элементах РК, будет зависеть от мощности нагрузки, т. е. например, с уменьшением сопротивления нагрузки средняя мощность за период коммутации будет снижаться при прочих фиксированных параметрах (напряжение на входе ПН, длительность импульсов управления активными ключами). Данный эффект можно интерпретировать как отрицательную обратную связь (ООС) по току нагрузки, назовем ее параметрической ООС.

В качестве объекта исследования возьмем преобразователь напряжения повышающего типа с переключением КЭ при нулевых значениях тока (далее ПНТ-преобразователь) [6], схема силовой части которого представлена на рис. 2.

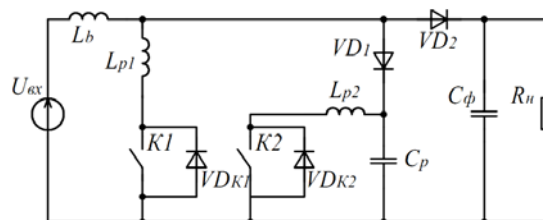


Рис. 2. Упрощенная схема силовой части ПНТ-преобразователя повышающего типа

Регулировочная характеристика данного преобразователя определена в [8] и имеет следующий вид

$$q = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{K_{\text{рх}} - \gamma_1} \quad (1)$$

$$K_{\text{рх}} = 1 + F_{\text{к}} \times \left(\frac{L_{\text{p1}} I_{\text{вх}}}{2U_{\text{вых}}} - \left(\frac{C_{\text{p}} U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{I_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} \sqrt{\frac{L_{\text{p1}}}{C_{\text{p}}}} \right)^2} \right] + \frac{\arccos\left(\frac{L_{\text{p2}}}{L_{\text{p1}}}\right) - \arcsin\left(\sqrt{\frac{L_{\text{p2}}}{L_{\text{p1}}}}\right)}{\omega_{\text{экр}}} \right) \right) \quad (2)$$

На рис. 3 представлено семейство передаточных характеристик в зависимости от регулирующего параметра (относительный коэффициент заполнения основного силового ключа К1 на рис. 2) при разных значениях входного тока с параметрами РК, приведенными в табл. 1. Также на данном графике представлена характеристика для классического повышающего ПН. Из графика видно, что характеристики ПН с резонансным режимом находятся выше, чем характеристика для классического ПН, при этом с уменьшением входного тока характеристика становится более крутой. Данный эффект говорит о том, что дифференциальное выходное сопротивление ПНТ-преобразователя выше, чем у классического ПН, что дает возможность реализовать параметрическое выравнивание входных токов.

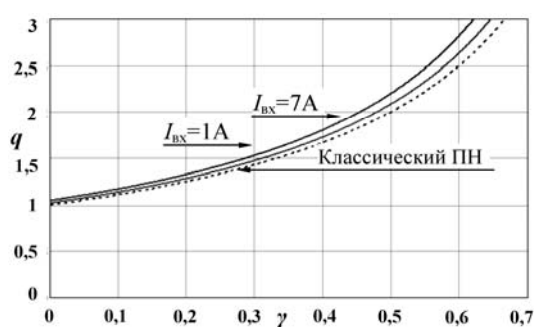


Рис. 3. Семейство передаточных характеристик

Далее определим, какой из элементов, входящих в РК, оказывает наибольшее влияние на выходное сопротивление. Для этого построим семейства характеристик, показывающих изменение коэффициента передачи ПНТ-преобразователя от входного тока при разных значениях L_{p1} (рис. 4) и L_{p2} (рис. 5). Резонансная емкость C_p согласно [9] должна быть как можно меньше для уменьшения статических потерь в цепи РК, поэтому оставляем её фиксированной. Из графиков, приведенных на рис. 4, видно, что увеличение индуктивности РК, последовательно включенной с основным ключом К1, приводит к увеличению выходного сопротивления, что в свою очередь улучшает выравнивание входных токов между параллельно включенными ячейками ПНТ-преобразователей.

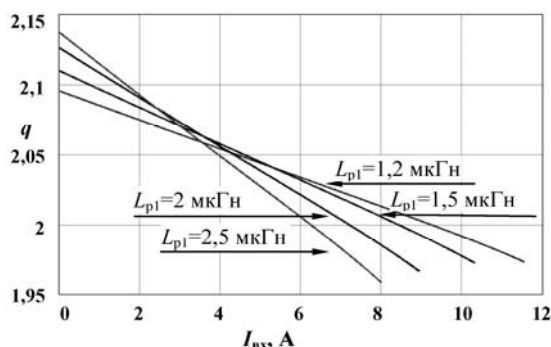


Рис. 4. Коэффициент передачи преобразователя в зависимости от входного тока при разных значениях L_{p1} при прочих фиксированных параметрах

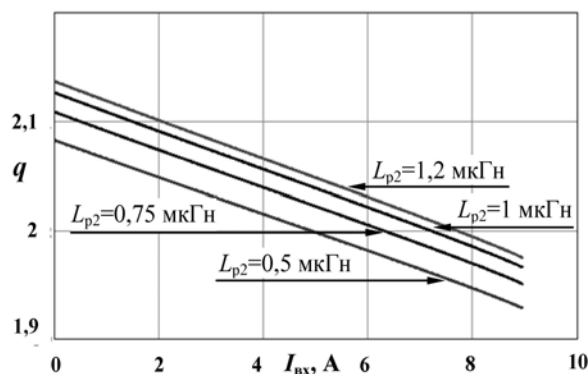


Рис. 5. Коэффициент передачи преобразователя в зависимости от входного тока при разных значениях L_{p2} при прочих фиксированных параметрах

Для организации распределения мощности между параллельно работающими ячейками ПН повышающего типа необходимо контролировать распределение входных токов ячеек. Для параметрического токовыравнивания необходимо, чтобы во всем диапазоне допустимых отклонений величин, влияющих на выходной ток каждой из ячеек ПН, входной ток каждой ячейки находился в диапазоне допустимых значений. Оценку будем проводить с помощью функций полуотносительных чувствительностей (3)–(6) [10]. Здесь каждая из функций показывает отклонение входного тока, отнесенное к процентному отклонению значения одного из четырех параметров (L_{p1} , L_{p2} , C_p , γ) соответственно. Так как выразить входной ток из выражения (2) в явном виде затруднительно, для построения функций чувствительности воспользуемся P-spice моделью ПНТ-преобразователя, которая была ранее разработана авторами, а ее адекватность подтверждена сопоставлением результатов моделирования и экспериментальных осциллограмм резонансных циклов данного ПН, что отражено в [8]. На рис. 6–8 показаны графики функций полуотносительных чувствительностей по каждому параметру РК и управляющему параметру γ в зависимости от изменения выходного напряжения при прочих фиксированных параметрах. Все кривые построены по точкам, полученным при имитационном моделировании в формате P-spice для стационарных режимов, где все фиксированные параметры принимались из табл. 1.

$$Q_{L_{p1}}^r(I) = L_{p1} \cdot \frac{d}{dL_{p1}} I(\gamma_u, L_{p1}) \Big|_{\gamma_u = \gamma(I)} \quad (3)$$

$$Q_{L_{p2}}^r(I) = L_{p2} \cdot \frac{d}{dL_{p2}} I(\gamma_u, L_{p2}) \Big|_{\gamma_u = \gamma(I)} \quad (4)$$

$$Q_{C_p}^r(I) = C_p \cdot \frac{d}{dC_p} I(\gamma_u, C_p) \Big|_{\gamma_u = \gamma(U_{вх}, I)} \quad (5)$$

$$Q_{\gamma}^r(I) = \gamma_u \cdot \frac{d}{d\gamma_u} I(U_{вх}, \gamma_u) \Big|_{\gamma_u = \gamma(U_{вх}, I)} \quad (6)$$

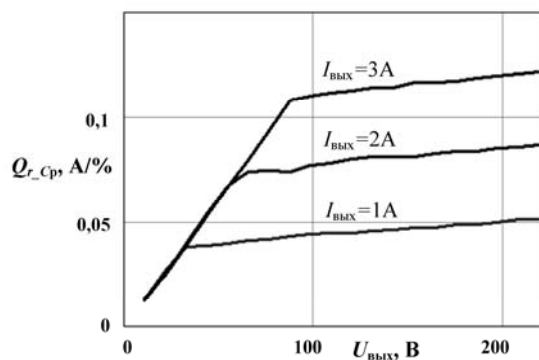


Рис. 6. График отклонения входного тока по отношению к отклонению емкости C_p в зависимости от выходного напряжения при разных средних значениях выходного тока

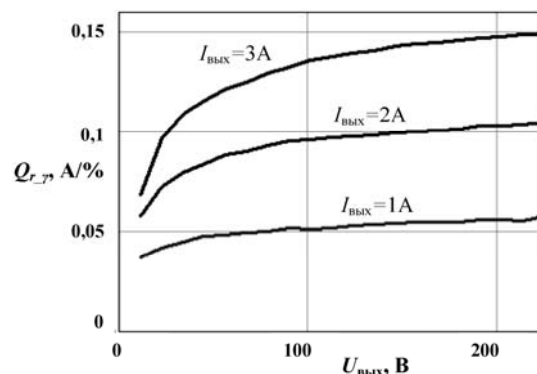


Рис. 7. График отклонения входного тока по отношению к отклонению коэффициента заполнения управляющего сигнала в зависимости от выходного напряжения при разных средних значениях выходного тока

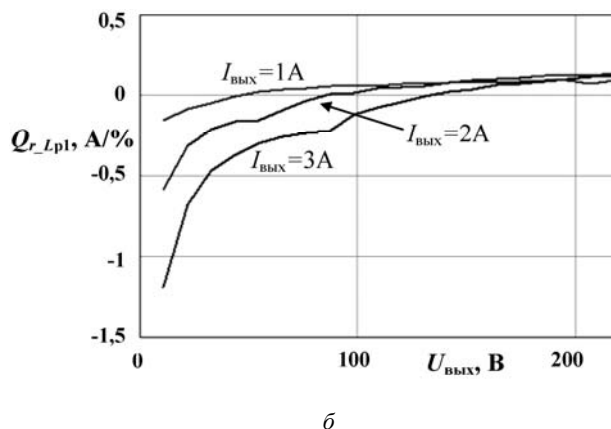
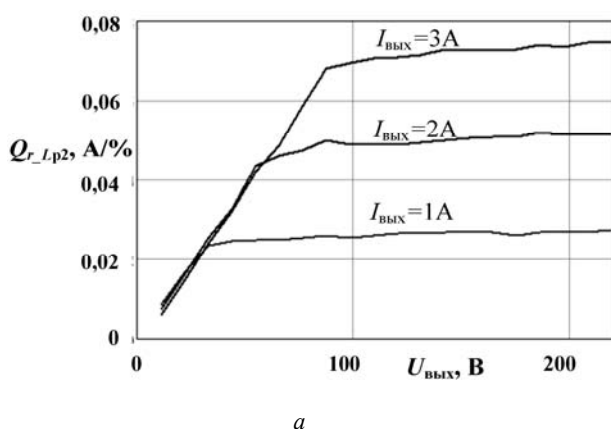


Рис. 8. Графики отклонения входного тока по отношению к отклонению значений индуктивности L_{p2} (а) и L_{p1} (б) в зависимости от выходного напряжения при разных средних значениях выходного тока

Таблица 1

Параметр	C_p	L_{p1}	L_{p2}	$R_{н, мин}$	L_p	C_f	$U_{вх}$	$U_{вых}$	f_k
Значение	16 нФ	2 мкГн	1 мкГн	33,33 Ом	200 мкГн	47 мкФ	50...80 В	100 В	200 кГц

Приведенные результаты моделирования показывают, что наибольшую чувствительность по разбалансировке входных токов имеет управляющий параметр – относительный коэффициент заполнения импульса управления основным ключом (К1 на рис. 2).

Таким образом, если при параметрах ПН, заданных в табл. 1, разбалансировку по входным токам задать не более 10 % (под разбалансировкой тока имеется ввиду отклонение входного тока N -ой ячейки ПН относительно суммы значений входных токов, поделенной на количество ячеек), то максимальная разница между параметрами L_{p1} ячеек ПН не должна превышать 7 %, а между параметрами L_{p2} и C_p – 5 % и 4 % соответственно.

Максимальное отклонение относительного коэффициента заполнения управляющих импульсов друг относительно друга не должно превышать также 4 %.

На рис. 9 показана внешняя характеристика, полученная в результате имитационного моделирования в формате P-spice, отражающая зависимость выходного напряжения от входного тока, т. е. от мощности нагрузки, что также подтверждает наличие повышенного дифференциального выходного сопротивления ПНТ-преобразователя повышающего типа.

На рис.10 показан результат имитационного моделирования в формате P-spice двух параллельно включенных ячеек ПНТ-преобразователей, работающих в режиме стабилизации выходного напряжения при ступенчатом изменении мощности. Между параметрами РК был введен разброс в пределах 10 % для L_{p1} и L_{p2} и 14 % для C_p по отношению к наименьшему значению из двух (табл. 2). Из представленных диаграмм видно, что как в установившемся, так и в переходном режиме разбалансировка входных токов, является не значительной и не превышает 10%-го отклонения.

Таблица 2

Ячейка №	L_{p1}	L_{p2}	C_p	$U_{\text{вых}}$	$U_{\text{вх}}$
1	2,2 мкГн	1,1 мкГн	14 нФ	100 В	50 В
2	2 мкГн	1 мкГн	16 нФ		

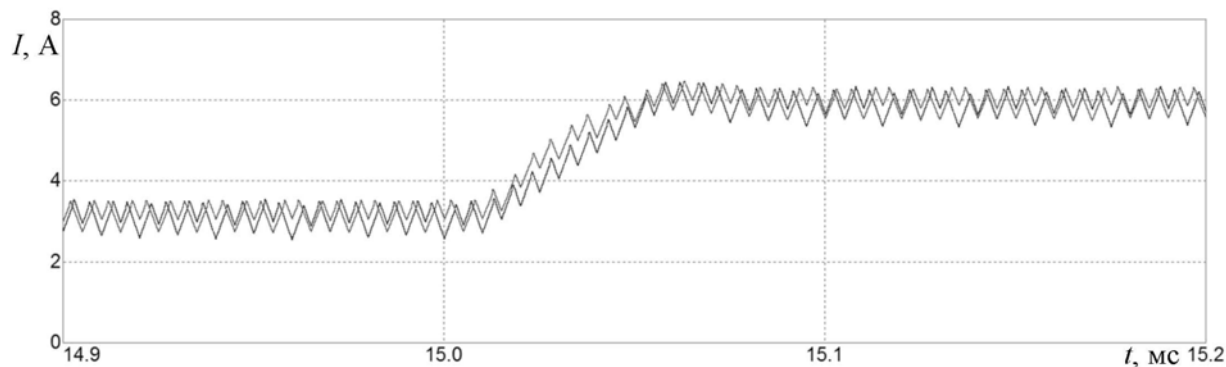


Рис. 10. Переходный процесс по входному току для каждой из двух параллельно включенных ячеек ПНТ-преобразователей, работающих в режиме стабилизации выходного напряжения (100В) при ступенчатом изменении мощности нагрузки

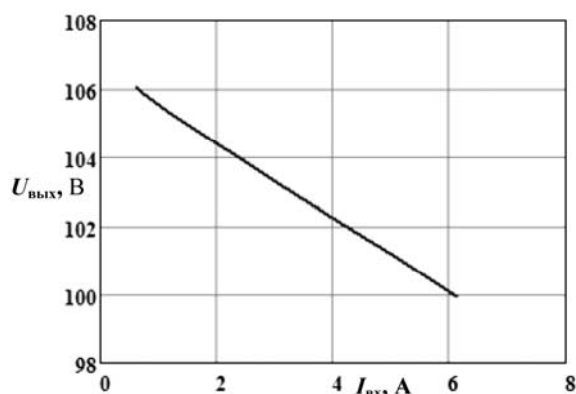


Рис. 9. Внешняя характеристика ПНТ-преобразователя повышающего типа

Теоретическое исследование параллельной работы ПН с резонансным режимом в цепи стабилизатора напряжения показало, что большое внутреннее сопротивление, определяемое параметрами РК, позволяет выравнивать токи между параллельно работающими ячейками ПН без дополнительных контуров управления. Равномерность распределения токов будет тем выше, чем выше значение индуктивности РК, включенной последовательно с основным ключом ПНТ-преобразователя повышающего типа при прочих фиксированных параметрах. При этом, разброс значений коэффициента заполнения γ управляющих сигналов должен быть относительно мал, что не может быть обеспечено отдельными формирователями ШИМ – сигнала. Это, в свою очередь, предполагает применение цифрового способа формирования управляющих импульсов ШИМ-сигналов, сдвинутых друг относительно друга по фазе.

Библиографические ссылки

1. Конев Ю. И., Гулякович Г. Н., Полянин К. П. Микроэлектронные электросистемы. Применения в радиоэлектронике. М. : Радио и связь, 1987. 240 с.
2. Соустин Б. П., Иванчура В. И., Чернышев А. И., Исляев Ш. Н. Системы электропитания космических аппаратов. Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма, 1994. 318 с.
3. Patel M. R. Spacecraft Power System. N. Y. : CRC Press, 2005. 961 p.
4. O'Sullivan D., Weinberg A. The sequential switching shunt regulator S3R // Proceedings of the third ESTEC Spacecraft power conditioning seminar (ESA SP-126), Noordwijk, The Netherlands, 1977. P. 123–131.
5. Лукин А. В. Квазирезонансные преобразователи постоянного напряжения // Электропитание. 1993. Вып. 2. С. 24–37.
6. Cho Bo Hyung. Novel zero-current-switching (ZCS) PWM switch cell minimizing additional conduction loss // IEEE Transactions on industrial electronics. Vol. 49, No. 1, February 2002. P. 165–171.
7. Erickson R. W. Fundamentals of Power Electronics. First Edition. New York : Chapman and Hall, May 1997. 791 p.
8. Горяшин Н. Н., Зорин А. Н. Исследование повышающего преобразователя напряжения с переключением при нулевых значениях тока // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 1(47). С. 18–23.
9. Goryashin N., Zorin A. Optimization of Resonant Tank Parameters of Zero-Current-Switch Boost Converter // Proceedings of 14th IEEE International conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices at Altai. Russia, July 2013. P. 395–398.
10. Горяшин Н. Н., Лукьяненко М. В., Соломатова А. А., Хорошко А. Ю. Параллельная работа им-

пульсных преобразователей напряжения с резонансным переключением // Вестник МАИ. М., 2012. Вып. 4. С. 141–146.

References

1. Konev U. I., Gulyakov G. N., Polyanin K. P. *Microelectronnie electrosistemi. Primeneniya v radioelectronike* (Microelectronic electric systems. Application in electronics). М. : Radio i svyaz, 1987, 240 p.
2. Soustin B. P., Ivanchura V. I., Chernishev A. I., Islyayev H. N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* (Power supply systems of spacecrafts) Novosibirsk, Nauka, Sibirskaya izdatelskaya firma, 1994, 318 p.
3. Patel M. R. *Spacecraft Power System*. N. Y. : CRC Press, 2005, 961 p.
4. O'Sullivan D., Weinberg A. The sequential switching shunt regulator S3R. Proceedings of the third

ESTEC Spacecraft power conditioning seminar (ESA SP-126), Noordwijk, The Netherlands, 1977, pp. 123–131.

5. Lukin A. V. *Elektropitanie*. 1993. № 2. p. 24–37.
6. Cho Bo Hyung. Novel zero-current-switching (ZCS) PWM switch cell minimizing additional conduction loss. IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 49, no. 1, February 2002, p. 165–171.
7. Erickson R. W. *Fundamentals of Power Electronics*. New York : Chapman and Hall, May 1997, 791 p.
8. Goryashin N. N., Zorin A. N. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 47, p. 18–23.
9. Goryashin N. N., Zorin A. N. Proceedings of 14th IEEE International conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices at Altai. Russia, July 2013, p. 395–398.
10. Goryashin N. N., Luckyanenko M. V., Solomatova A. A., Khoroshko A. U. *Vestnik MAI*. 2012, no. 4, p. 141–146.

© Горяшин Н. Н., Зорин А. Н., Лукьяненко М. В., Соломатова А. А., 2013

УДК 539.3

УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ СЛЕДЯЩЕЙ НАГРУЗКИ

Ю. В. Захаров^{1,2}, А. К. Никулин¹, Н. В. Филенкова¹, А. Ю. Власов¹

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

²Сибирский государственный технологический университет
Россия, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82. E-mail: yuzakharov@mail.ru

Проблема устойчивости стержня Бека до сих пор актуальна, так как не было однозначно экспериментально подтверждено теоретическое значение критической тангенциальной нагрузки на упругий стержень, например, возникающей при воздействии ракетного двигателя на упругую консоль. В работе приближенными аналитическими методами рассмотрено влияние силы, запаздывающей относительно тангенциального положения, и показано, что такой тип нагрузки может привести к динамической потере устойчивости для постоянной, устойчивых в модели Бека. Приведены условия потери устойчивости. Найденные решения расширяют возможности анализа устойчивости и закритического поведения сложных нелинейных систем. Сформулировано новое направление анализа отклонений от идеальной модели Бека.

Ключевые слова: стержень Бека, потеря устойчивости, тангенциальная нагрузка, запаздывание нагрузки.

STABILITY OF A COLUMN UNDER THE RETARDING FOLLOWER LOAD

Yu. V. Zakharov^{1,2}, A. K. Nikulin^{1,2}, N. V. Filenkova², A. Yu. Vlasov²

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: yuzakharov@mail.ru

²Siberian State Technological University
82 Mira prosp., Krasnoyarsk, 660049, Russia. E-mail: yuzakharov@mail.ru

The problem of stability of Beck's column is still relevant, as there are no any unambiguous experimental confirmations of the theoretically calculated value of the critical tangential load on the elastic column, where the load may be caused by the effect of the rocket engine, for example.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.B37.21.0405 «Моделирование композитных элементов крупногабаритных трансформируемых механических систем космических аппаратов связи и телекоммуникаций».

This article presents the estimation of the influence of the thrust that is delayed toward the tangential position. The estimation has been derived using approximate analytical methods and proves the existence of the dynamic loss of stability even for the states that are stable in the Beck's model. The conditions of the loss of stability are clearly demonstrated. The found solutions extend the capabilities of analysis of the stability and overcritical behavior of the complex nonlinear systems. A new direction of analysis of the deviations from the Beck's model has been formulated.

Keywords: Beck's column, loss of stability, tangential load, force with delay

Вопрос о воздействии тангенциальной нагрузки на упругий стержень рассматривался во многих работах. Николаи [1] показал, что стержень под действием тангенциальной нагрузки не имеет статических форм потери устойчивости. Беком [2] было найдено, что под действием тангенциальной силы потеря устойчивости происходит по динамическому сценарию (флаттер). Такая потеря устойчивости должна происходить при нагрузках близких к 9 силам Эйлера, но проблемой оказалось экспериментальное подтверждение критической нагрузки. Еще в 60-х Тимошенко [3] писал о невозможности современными методами реализовать стержень Бека. До сих пор этот вопрос открыт, хотя обсуждался многими авторами (см., например, обзор [4]). По моделированию консоли Бека был выполнен ряд работ, например, [5–7]. В работе [5] сопоставлялись частотно-силовые характеристики, полученных теоретически и экспериментально при малых нагрузках совпадали с теоретической моделью, хотя значение критической нагрузки оставалось меньше 9 сил Эйлера. В экспериментах Янге [7] была получена критическая нагрузка около 6 сил Эйлера. В работе [6] рассматривалось влияние воздействия ракетного двигателя на упругую консоль.

Из-за сложности реализации данной системы существует несколько теоретических моделей, рассматривающих отклонение от идеального стержня Бека, назовем основные: наличие дополнительной консервативной нагрузки [6], учет трения в системе [8] и колебание положения или значения силы [9]. Данные модели используются для объяснения отличия экспериментальных результатов от идеальной модели Бека.

Одни из наиболее подробных исследований тангенциальной нагрузки были проведены в серии экспериментов Сагиямой [6; 15]. Автор использовал для моделирования нагрузки ракетный двигатель. В ходе своих исследований Сагияма представил серию фотографий стержня под действием субтангенциальной нагрузки.

Исследования влияния тангенциальной нагрузки проводились не только на консоли, но и на пластинах [10] и маятниках [11]. В работе [11] рассматривались отклонения от идеальной системы, вызванные запаздыванием поворота тангенциальной нагрузки для обычного и двухзвеньевого маятника. Но для стержня исследование запаздывания тангенциальной нагрузки проводилось.

В данной работе мы рассматриваем задачу об упругой консоли под действием запаздывающей относительно тангенциального положения нагрузки.

Модель запаздывания. Для консоли под действием тангенциальной нагрузки нейтральная линия сво-

бодного конца должна совпадать с направлением действующей силы. Рассмотрим случай, когда сила при начавшемся повороте стержня не успевает повернуться в тангенциальное положение, и будем называть такое состояние запаздыванием.

Допустим, что существует постоянное время запаздывания τ^* , тогда угол φ действующей силы к оси Ox

$$\varphi(t^*) = -\theta(L, t^* - \tau^*), \quad (1)$$

где $\theta(l, t^*)$ – угол наклона нейтральной линии консоли к оси Ox , L – длина стержня, l – криволинейная координата, t^* – время. Из уравнения (1) следует, что для поворота силы до угла $\theta(l, t)$ необходимо время τ^* (рис. 1).

Запаздывание нагрузки относительно тангенциального положения может быть вызвано разностью времени поворота стержня и силы. Причиной расхождения в положении стержень-сила может быть инертность реактивной струи или другого источника тангенциальной нагрузки.

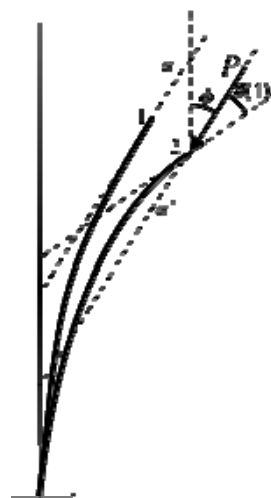


Рис. 1. Модель запаздывания тангенциальной нагрузки. Состояние 1 – форма в момент времени $t^* - \tau^*$; 2 – форма стержня в момент времени t^* , под воздействием силы P

Колебание стержня с запаздыванием. Рассмотрим колебание упругого стержня длиной L , жесткостью EI и погонной массой M , на который действует запаздывающая тангенциальная нагрузка P .



Рис. 2. Модель стержня

Уравнение колебания такой системы имеет вид

$$\frac{\partial^4 w}{\partial s^4} + q^2 \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} + \omega^2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где $w(s, t)$ – амплитуда колебания; $s = l/L$, $q^2 = P/F_{эл}$, $t = \Omega t^*$, $\omega^2 = \Omega^2 M l^4 / EI$ – безразмерные длина, сила, время, частота соответственно; Ω – частота колебания стержня; $F_{эл} = (\pi/2)^2 EI/l^2$ – сила Эйлера. Граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} w(0, t) = 0, \quad w'(0, t) = 0, \quad w''(1, t) = 0, \\ w'''(1, t) = -q^2 (w'(1, t) + \varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь штрихи обозначают дифференцирование по координате.

Без учета запаздывания в задаче для стержня Бека [2] $w'''(1, t) = 0$, т. е. при $\tau = 0$ угол $\varphi = -w'(1, t)$. Перепишем условие (3) с учетом условия запаздывания (1)

$$w'''(1, t) = -q^2 (w'(1, t) - w'(1, t - \tau)). \quad (4)$$

где $\tau = \Omega \tau^*$ – безразмерное время запаздывания.

Решение уравнения (2) мы будем искать в виде

$$w(s, t) = W_+(s, t) + W_-(s, t), \quad (5)$$

где $W_+(s, t)$ и $W_-(s, t)$ являются линейно независимыми решениями вида

$$\begin{aligned} W_+(s, t) &= A e^{it} w_+(s), \\ W_-(s, t) &= B e^{-it} w_-(s). \end{aligned} \quad (6)$$

Подставим решение (5) в уравнение (2), получим, что $w_+(s) = w_-(s) = w(s)$ и имеют вид

$$w(s) = C_1 \sin r_1 s + C_2 \cos r_1 s + C_3 \operatorname{sh} r_2 s + C_4 \operatorname{ch} r_2 s \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} r_1^2 &= \frac{q^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{q^2}{2}\right)^2 + \omega^2}, \\ r_2^2 &= -\frac{q^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{q^2}{2}\right)^2 + \omega^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

здесь ω не зависит от координаты и времени.

Из первых двух уравнений граничных условий (3) получим

$$C_2 = -C_4, \quad r_1 C_1 = -r_2 C_3. \quad (9)$$

Используя третье и четвертое уравнения условия (3), построим систему уравнений

$$\begin{cases} (-r_1^2 \sin r_1 - r_1 r_2 \operatorname{sh} r_2) C_1 + \\ + (-r_1^2 \cos r_1 - r_2^2 \operatorname{ch} r_2) C_2 = 0, \\ ((-r_1^3 + r_1 p_{пов}) \cos r_1 - r_1 (r_2^2 + p_{пов}) \operatorname{ch} r_2) C_1 + \\ + ((r_1^3 - r_1 p_{пов}) \sin r_1 - (r_2^3 + r_2 p_{пов}) \operatorname{sh} r_2) C_2 = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где введено обозначение $p_{пов} = q^2(1 - \exp(-i\tau))/2$ для решения $W_+(s, t)$.

Нетривиальные решения для системы (10) будут существовать при условии

$$\begin{vmatrix} -r_1^2 \sin r_1 - r_1 r_2 \operatorname{sh} r_2 \\ -r_1^2 \cos r_1 - r_2^2 \operatorname{ch} r_2 \\ (-r_1^3 + r_1 p_{пов}) \cos r_1 - r_1 (r_2^2 + p_{пов}) \operatorname{ch} r_2 \\ (r_1^3 - r_1 p_{пов}) \sin r_1 - (r_2^3 + r_2 p_{пов}) \operatorname{sh} r_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

Определитель системы (11) приводит к уравнению

$$\begin{aligned} r_1^4 + r_2^4 - p_{пов} (r_1^2 - r_2^2) + (2r_1^2 r_2^2 + p_{пов} (r_1^2 - r_2^2)) \times \\ \times \cos r_1 \operatorname{ch} r_2 - r_1 r_2 (r_2^2 + 2p_{пов} - r_1^2) \sin r_1 \operatorname{sh} r_2 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя определения r_1, r_2 (8), перепишем уравнение (12)

$$\begin{aligned} q^4 + 2\omega^2 - p_{пов} q^2 + (2\omega^2 + p_{пов} q^2) \cos r_1 \operatorname{ch} r_2 + \\ + \omega (q^2 - 2p_{пов}) \sin r_1 \operatorname{sh} r_2 = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

В общем случае частота ω является комплексной и имеет действительную ω' и мнимую ω'' части

$$\omega = \omega' + i\omega''. \quad (14)$$

Безразмерная частота ω линейно зависит от Ω , которая также является комплексной. Величина нормировки частоты положительна. И тогда решение уравнения (2) будет асимптотически устойчиво при $\omega'' > 0$ для $W_+(s, t)$ и $\omega'' < 0$ для $W_-(s, t)$. Перепишем уравнение (13), используя выражение (14)

$$\begin{aligned} q^4 + 2\omega'^2 - q^2 p'_{пов} + (2\omega'^2 + q^2 p'_{пов}) \cos r_1 \operatorname{ch} r_2 + \\ + (\omega' (q^2 - 2p'_{пов}) - 2\omega'' p''_{пов}) \sin r_1 \operatorname{sh} r_2 + \\ + i \{ 4\omega' \omega'' + q^2 p''_{пов} + (4\omega' \omega'' - q^2 p''_{пов}) \cos r_1 \operatorname{ch} r_2 + \\ + (\omega'' (q^2 - 2p'_{пов}) + 2\omega' p''_{пов}) \sin r_1 \operatorname{sh} r_2 \} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} p'_{пов} &= \frac{q^2}{2} (1 - \cos \tau), \\ p''_{пов} &= \frac{q^2}{2} \sin \tau. \end{aligned} \quad (16)$$

Уравнение (15) будет иметь решение, когда действительная и комплексная части (15) будут равны 0

$$\begin{cases} q^4 + 2\omega'^2 - q^2 p'_{пов} + (2\omega'^2 + q^2 p'_{пов}) \cos r_1 \operatorname{ch} r_2 + \\ + (\omega' (q^2 - 2p'_{пов}) - 2\omega'' p''_{пов}) \sin r_1 \operatorname{sh} r_2 = 0, \\ 4\omega' \omega'' + q^2 p''_{пов} + (4\omega' \omega'' - q^2 p''_{пов}) \cos r_1 \operatorname{ch} r_2 + \\ + (\omega'' (q^2 - 2p'_{пов}) + 2\omega' p''_{пов}) \sin r_1 \operatorname{sh} r_2 = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Решения системы уравнений (17) будем анализировать графическим (рис. 3) и численным методами (рис. 4).

Для рис. 3 была выбрана серия зависимостей графического решения системы (17) при постоянной на-

грузке, равной 6 силам Эйлера, и различных значениях τ . Пунктирной и сплошной линиями обозначены зависимости ω'' от ω' для первого и для второго уравнения системы (17) соответственно.

Решениями системы уравнений (17) будет пересечение данных зависимостей. Видно, что на рис. 3 пересечения зависимостей происходят в нижней полуплоскости, что соответствует отрицательному значе-

нию комплексной составляющей частоты. Мы рассматриваем случай для $W_+(s, t)$, следовательно, такие состояния неустойчивы.

Численным методом были получены частотно-силовые характеристики для первой и второй мод колебания при $\tau = 0,01$. Из рис. 4 видно, что при нагрузках до 6 сил Эйлера мнимые части первой и второй мод колебаний отрицательны, что соответствует флаттеру.

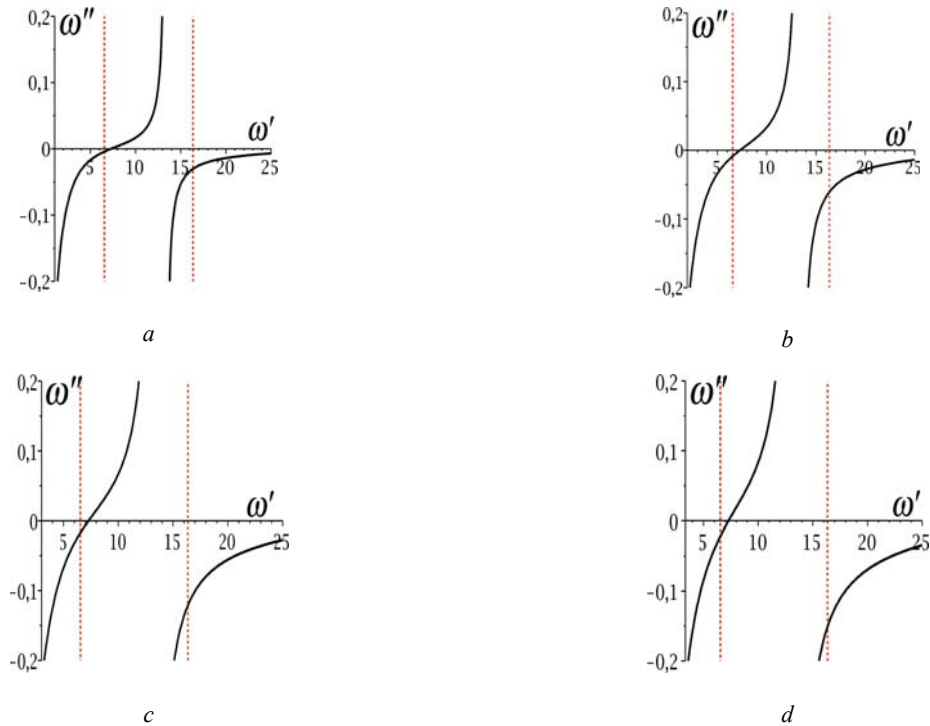


Рис. 3. Частоты колебания при 6 силах Эйлера; $a - \tau = 0,05$; $b - \tau = 0,1$; $c - \tau = 0,2$; $d - \tau = 0,25$

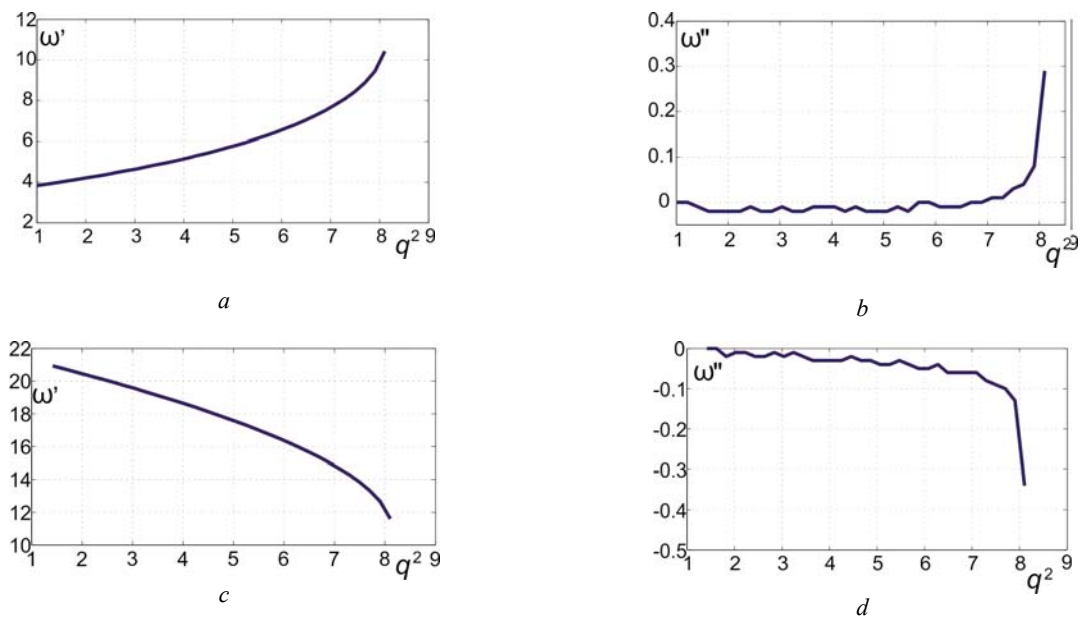


Рис. 4. Частоты колебания при $\tau = 0,01$; a – действительная часть первой моды; b – мнимая часть первой моды; c – действительная часть второй моды; d – мнимая часть второй моды

После достижения этой нагрузки первая мода становится асимптотически устойчивой, хотя вторая остается в неустойчивом состоянии. По этой причине динамическая потеря устойчивости при запаздывании может происходить при любом значении силы, но при малых τ этот процесс может быть достаточно медленным.

Было показано, что колебание стержня под воздействием силы, запаздывающей относительно тангенциального положения, будет всегда динамически неустойчивым. При малых временах запаздывания нарастание амплитуды будет происходить медленно. Показано, что при изменении нагрузки возможна стабилизация первой моды колебания.

Библиографические ссылки

1. Николаи Е. Л., Об устойчивости прямолинейной формы равновесия сжатого и скрученного стержня / Изв. Ленингр. политехн. ин-та. Т. 31. 1928. С. 201–231.
2. Beck M., Die Knicklast des einseitig eingespannten, tangential gedrückten Stabes // ZAMM. 1952. Vol. 3. P. 205–208.
3. Timoshenko S. P., Gere J. M. Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, Auckland, 1963. 156 p.
4. Elishakoff I. Controversy associated with the so-called “follower force”: critical overview // Application Mechanics Reviews. 2005. Vol. 58. P. 117–142.
5. Wood W. G., Saw S. S., Saundres P. M. The kinetic stability of a tangentially loaded strut // Proc. R. Soc. London. 1969. Ser. A. Vol. 313. P. 239–248.
6. Sugiyama Y., Langthjem M. A., Ryu B. J. Realistic Follower Forces // J. Sound Vib. 1999. Vol. 205(4). P. 779–782.
7. Ягн И. Ю., Паршин Л. К. Экспериментальное исследование стабильности стержня под действием следящей нагрузки // ДАН СССР. 1969. № 167(1). С. 49–50.
8. Elfelsoufi Z., Azrar L. Integral equation formulation and analysis of the dynamic stability of damped beams subjected to subtangential follower forces // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 296. P. 690–713.
9. Celep Z. Dynamic stability of pretwisted columns under periodic axial loads // Journal of Sound and Vibration. 1985. Vol. 103(1). P. 35–42.
10. Datta P. K., Biswas S. Aeroelastic Behaviour of Aerospace Structural Elements with Follower Force: A Review // Intl. J. of Aeronautical & Space Sci. 2011. Vol. 12(2). P. 134–148.

11. Haitao Ma, Eric A. Butcher Stability of elastic columns with periodic retarded follower forces // Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 286. P. 849–867.

12. The parametrically excited upside-down rod: an elastic jointed pendulum model / J. Gallana, W. B. Fraserb, D. J. Achesonc, A. R. Champneys // Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 280. P. 359–377.

13. Sugiyama Y., Langthjem M. A., Ryu B. J. Follower Forces // J. Sound Vib. 1999. Vol. 205(4). P. 779–782.

14. Koiter W. T. Unrealistic Follower Forces // J. Sound Vib. 1996. Vol. 174. P. 636–638.

15. Sugiyama Y., Katayama K., Kinoi S. Flutter of cantilevered column under rocket thrust // Journal of Aerospace Engineering. 1995. Vol. 8. P. 9–15.

References

1. Nikolai E. L. *Izv. Leningr. politekhn. in-ta*, 1928, vol. 31, p. 201–231.
2. Beck M., Die Knicklast des einseitig eingespannten, tangential gedrückten Stabes, *ZAMM*, 1952, vol. 3, p. 205–208.
3. Timoshenko S. P., and Gere, J. M. Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, Auckland, 1963, 156 p.
4. Elishakoff I., Controversy associated with the so-called “follower force”: critical overview, *Application Mechanics Reviews*, 2005, vol. 58, p. 117–142.
5. Wood W. G., Saw S. S., Saundres P. M. *Proc. R. Soc. London*, 1969, Ser. A., vol. 313, p. 239–248.
6. Sugiyama Y., Langthjem M. A., Ryu B. J. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, vol. 205(4), p. 779–782.
7. Yagn I. Yu. *DAN SSSR*, 1969, vol. 167(1), p. 49.
8. Elfelsoufi Z., Azrar L. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, vol. 296, p. 690–713.
9. Celep Z., *Journal of Sound and Vibration*, 1985, vol. 103(1), p. 35–42.
10. Datta P. K., Biswas S. *Intl. J. of Aeronautical & Space Sci.*, 2011, vol. 12(2), p. 134–148.
11. Haitao Ma, Butcher Eric A. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 286, p. 849–867.
12. Gallana J., Fraserb W. B., Achesonc D. J., Champneys A. R. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 280, p. 359–377.
13. Sugiyama Y., Langthjem M. A., Ryu B. J. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, vol. 205(4), p. 779–782.
14. Koiter W. T. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, vol. 174, p. 636–638.
15. Sugiyama Y., Katayama K., Kinoi S. *Journal of Aerospace Engineering*, 1995, vol. 8, p. 9–15.

ТОНКАЯ КРУГОВАЯ ПЛАСТИНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ ГРАВИТАЦИОННОГО ТИПА*

Ю. В. Захаров^{1,2}, К. Г. Охоткин¹, А. В. Пашковский², А. Д. Скоробогатов², И. В. Уваев¹

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

²Сибирский государственный технологический университет
Россия, 660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82. E-mail: yuzakharov@mail.ru

Задача об устойчивости оболочек наряду с задачей об изгибе стержней являются всегда актуальной проблемой механики деформируемого твердого тела, особенно применительно к авиационно-ракетной технике. Основными типовыми элементами применяемых в устройствах исполнительной автоматики космических аппаратов являются гибкие пластины и оболочки. В этой работе рассмотрена задача изгиба тонкой круговой пластины под действием постоянной распределенной нагрузки гравитационного типа. Получено нелинейное интегро-дифференциальное уравнение, описывающее такой изгиб. Построено приближенное аналитическое решение поставленной задачи с учетом геометрической нелинейности. Решение найдено при условии малости прогиба по сравнению с радиусом пластины. Построены формы изогнутой пластины.

Ключевые слова: гравитационная нагрузка, изгиб пластины, геометрическая нелинейность.

THIN CIRCULAR PLATE UNDER A UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD OF THE GRAVITATIONAL TYPE

Yu. V. Zakharov^{1,2}, K. G. Okhotkin¹, A. V. Pashkovsky², A. D. Skorobogatov², I. V. Uvaev¹

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

²Siberian State Technological University
82 Mira prosp., Krasnoyarsk, 660049, Russia. E-mail: yuzakharov@mail.ru

The problem of stability of shells and the problem of bending of columns are always relevant topics of the mechanics of deformable body, especially in the field of aviation and missile technology. The most common types of elements that are used in the automatic actuators of spacecrafts are flexible plates and shells. This article demonstrates an approach to the problem of bending of the thin circular plate under the constant distributed load of the gravitational type. The problem is presented in the form of nonlinear integral-differential equation that describes such bending. An approximate analytical solution that takes into account the geometric nonlinearity has been derived. The solution has been found under the condition that the deflection is sufficiently smaller than the radius of the plate. The shapes of the bent plate have been built.

Keywords: load of the gravitational type, bent plate, geometrical nonlinearity.

В авиационной, ракетной, кораблестроительной и других областях промышленности всегда большое внимание привлекают проблемы устойчивости и колебаний различных конструкций: оболочек, мембран, стержневых систем и т. д.

Гибкие пластины и оболочки являются типовыми элементами микроэлектромеханических систем, применяемых в устройствах исполнительной автоматики космических аппаратов. Задача об устойчивости оболочек наряду с задачей об изгибе стержней являются всегда актуальной проблемой механики деформируемого твердого тела.

В работах [1–3] даётся общая методика исследования задач изгиба оболочек. В работах [4] и [5] методом стрельбы решается задача изгиба круглой мембраны при радиальном сжатии. В работе [6] решение задачи о радиальном сжатии круглой пластины решается в аналитическом виде. Работа [7] посвящена численному анализу задачи об изгибе круглой мембраны из ферроэласта в однородном магнитном поле. В настоящей работе предметом исследования является изгиб тонкой круговой пластины под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки постоянного направления.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.B37.21.0405 «Моделирование композитных элементов крупногабаритных трансформируемых механических систем космических аппаратов связи и телекоммуникаций», государственный контракт №14.513.11.0117.

Исследование изгиба круговой пластины под действием гравитационной нагрузки. Рассмотрим круговую пластину под действием распределенной нагрузки, направленной перпендикулярно её плоскости и сохраняющей свое направление. Для записи уравнений равновесия используем цилиндрическую систему координат, как показано на рис. 1.

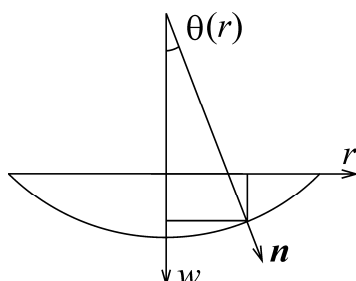


Рис. 1. Система координат

Исследование проводится в геометрически нелинейном случае, то есть $\frac{dr}{dl} = \cos \theta$, где r – радиальная координата, l – криволинейная длина, отсчитываемая от оси w , θ – угол наклона касательной к полярной оси.

В заданной системе координат система уравнений равновесия сил и моментов будет выглядеть следующим образом

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{d}{dl} (r F_r) - \frac{F_\phi}{r} = 0 \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dl} (r F_z) = q \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dl} (r M_r) - \frac{\cos \theta}{r} M_\phi = -F_r \sin \theta + F_z \cos \theta \end{cases}, \quad (1)$$

где F_r – погонная (на единицу длины) сила в радиальном направлении, F_ϕ – погонная трансверсальная сила, F_z – погонная сила в аксиальном направлении, $q = \text{const}$ – поверхностная плотность внешней распределенной нагрузки, M_r и M_ϕ – соответственно погонные радиальный и трансверсальный изгибающие моменты.

Преобразуем третье уравнение системы (1). Для этого применим закон Гука для линейно упругого материала

$$M_r = D(\kappa_r + \mu \kappa_\phi), \quad M_\phi = D(\kappa_\phi + \mu \kappa_r),$$

где $D = Eh^3/12(1-\mu)$ – цилиндрическая жесткость; h – толщина пластины; R – радиус; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; κ_r и κ_ϕ – соответственно главные радиальная и трансверсальная кривизны изогнутой поверхности пластины. Далее, учитывая соотношения для кривизн

$$\begin{aligned} \kappa_r &= \cos \theta \frac{d\theta}{dr}, \quad \kappa_\phi = \frac{\sin \theta}{r}, \\ \kappa_r + \kappa_\phi &= \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \sin \theta), \end{aligned}$$

получаем

$$\begin{cases} \frac{\cos \theta}{r} \frac{d}{dr} (r F_r) - \frac{F_\phi}{r} = 0 \\ \frac{\cos \theta}{r} \frac{d}{dr} (r F_z) = q \\ D \frac{d}{dl} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \sin \theta) \right) = -F_r \sin \theta + F_z \cos \theta \end{cases}. \quad (2)$$

Интегрируя первые два уравнения системы (2), имеем

$$\begin{aligned} F_r &= \frac{1}{r} \int F_\phi dl + \frac{C_1}{r} \\ F_z &= \frac{1}{r} \int \frac{q r dr}{\cos \theta} + \frac{C_2}{r} \end{aligned}. \quad (3)$$

Подставим (3) в третье уравнение системы (2), вынося общий множитель $1/r$ за скобки, получим

$$\begin{aligned} D \frac{d}{dl} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \sin \theta) \right) &= \\ = \frac{1}{r} \left[- \left(\int F_\phi dl + C_1 \right) \sin \theta + \left(\int \frac{q r dr}{\cos \theta} + C_2 \right) \cos \theta \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

При отсутствии внешней нагрузки, сосредоточенной по краю, в пластине в точке $r = R$ усилия равны 0, значит $F_r(R) = 0$ и $F_z(R) = 0$, поэтому $C_1 = 0$ и $C_2 = 0$. Используем следующее стандартное выражение для трансверсальной силы и соотношение между радиальным и трансверсальным продольными напряжениями

$$\begin{aligned} F_\phi &= h \sigma_\phi, \\ \sigma_\phi &= \cos \theta \frac{d}{dr} \left(\frac{r \sigma_r}{\cos \theta} \right). \end{aligned}$$

Радиальное напряжение направлено вдоль касательной, поэтому, как видно из рис. 1

$$\begin{aligned} \sigma_r &= q \sin \theta, \\ \sigma_\phi &= q \frac{d}{dl} (r \tan \theta), \end{aligned}$$

$$\int F_\phi dl = \int h q \frac{d}{dl} (r \tan \theta) dl = h q \int \frac{d}{dl} (r \tan \theta) dl = h q r \tan \theta.$$

Подставляя полученное выражение в (4), получаем, учитывая, что $dr = \cos \theta dl$

$$D \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \sin \theta) \right) = \frac{1}{r} \left[-h q r \tan^2 \theta + \int \frac{q r dr}{\cos \theta} \right]. \quad (5)$$

Раскрывая скобки в левой части уравнения (5), получим интегро-дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} D \frac{d^2 \sin \theta}{dr^2} + D \frac{1}{r} \frac{d \sin \theta}{dr} - \\ - D \frac{\sin \theta}{r^2} + h q r \tan^2 \theta = \frac{1}{r} \int \frac{q r dr}{\cos \theta}. \end{aligned} \quad (6)$$

Построим далее приближенное аналитического решение нелинейного уравнения (6) в предположении малости прогиба пластины. Будем считать, что угол

наклона касательной θ изменяется очень медленно, следовательно, $\cos\theta$ под знаком интеграла мало отличается от 1. В свою очередь, r меняется от 0 до R , тем самым определяя поведение подинтегральной функции. Поэтому в интегральном члене можно воспользоваться теоремой о среднем и положить $\cos\theta = 1$. После такого упрощения мы получим дифференциальное уравнение

$$D \frac{d^2 \sin \theta}{dr^2} + D \frac{1}{r} \frac{d \sin \theta}{dr} - D \frac{\sin \theta}{r^2} + hqr \sin^2 \theta = \frac{qr}{2},$$

или, объединяя первые два слагаемых, получим

$$D \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d \sin \theta}{dr} \right) - D \frac{\sin \theta}{r^2} + hqr \sin^2 \theta = \frac{qr}{2}. \quad (7)$$

Уравнение имеет ядро r и, следовательно, особую точку при $r = 0$. Поэтому в центре пластины ставится условие ограниченности решения.

Обезразмерим уравнение (7), произведя замену $x = r/R$, имеем

$$DR^2 \frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left(x \frac{d \sin \theta}{dx} \right) - DR^2 \frac{\sin \theta}{x^2} + \frac{hqx \sin^2 \theta}{R} = \frac{qx}{2R},$$

$$\frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left(x \frac{d \sin \theta}{dx} \right) - \frac{\sin \theta}{x^2} + \frac{hqx \sin^2 \theta}{DR^3} = \frac{qx}{2DR^3}.$$

Введем новый безразмерный параметр нагрузки $k \equiv q/(DR^3)$, тогда уравнение преобразуется к виду

$$\frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left(x \frac{d \sin \theta}{dx} \right) - \frac{\sin \theta}{x^2} + hkx \sin^2 \theta = \frac{k}{2} x. \quad (8)$$

Граничные условия при жестком закреплении по контуру имеют вид

$$|\theta(0)| < \infty, \quad \theta(1) = 0 \quad (9)$$

Так как прогиб пластины мал, можно считать, что $\sin \theta \gg \sin^2 \theta$. Из того, что $0 \leq x \leq 1$, следует $\frac{\sin \theta}{x^2} \gg hkx \sin^2 \theta$, значит, можно положить $hkx \sin^2 \theta = 0$, тогда уравнение (8) приводится к виду

$$\frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left(x \frac{d \sin \theta}{dx} \right) - \frac{\sin \theta}{x^2} = \frac{k}{2} x,$$

$$|\theta(0)| < \infty, \quad \theta(1) = 0.$$

Обозначая для простоты записи $\sin(\theta(x)) = y(x)$, и раскрывая скобки, получаем линеаризованное уравнение

$$x^2 y'' + xy' - y = \frac{k}{2} x^3. \quad (10)$$

Решение его найдем методом вариации произвольных постоянных, для этого решим однородное уравнение, соответствующее (10)

$$x^2 y'' + xy' - y = 0. \quad (11)$$

Решение его пишется сразу

$$y = C_1 x + \frac{C_2}{x}. \quad (12)$$

Считая C_1 и C_2 зависящими от x , подставим (11) в (9), тогда получаем систему уравнений

$$C_1' x + \frac{C_2'}{x} = 0, \quad C_1' - \frac{C_2'}{x^2} = \frac{k}{2} x. \quad (13)$$

Разделим первое уравнение (13) на x и сложим со вторым, затем умножим второе уравнение на $-x$ и сложим с первым. Получим

$$C_2' = -\frac{k}{4} x^3, \quad C_1' = \frac{k}{4} x. \quad (14)$$

Следовательно,

$$C_2 = -\frac{k}{16} x^4 + C_{20}, \quad C_1 = \frac{k}{8} x^2 + C_{10}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (10), имеем окончательно

$$\sin \theta = C_{10} x + \frac{C_{20}}{x} + \frac{k}{16} x^3. \quad (16)$$

Ввиду первого граничного условия (9), $C_{20} = 0$. Применяя второе условие (9), получаем

$$C_{10} = -\frac{k}{16}. \quad (17)$$

Тогда

$$\sin \theta = \frac{k}{16} (x^3 - x). \quad (18)$$

Криволинейная длина и прогиб определяются по формулам

$$l(r) = \int_0^r \frac{dr}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta(r)}}, \quad w(r) = - \int_r^R \frac{\sin^2 \theta(r) dr}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta(r)}}. \quad (19)$$

С учетом (17), выражения (18) принимают вид

$$l(r) = \int_0^x \frac{dx}{\sqrt{1 - k_1^2 (x^3 - x)^2}},$$

$$w(r) = - \int_x^1 \frac{k_1^2 (x^3 - x)^2 dx}{\sqrt{1 - k_1^2 (x^3 - x)^2}}. \quad (20)$$

Здесь введено обозначение $k_1 = k/16$. Построенное решение (20) соответствует первой моде статического нагружения пластины.

Из условия неотрицательности подкоренного выражения в интегралах (20) следует, что максимальное значение $k_1 \approx 2,5$. Так как в данной работе рассматривались малые прогибы, то мы ограничились значениями $k_1 < 1$. При этом прогиб не превосходит значения 0,1.

Формы изогнутой пластины приведены на рис. 2. Величина внешней нагрузки q , геометрические и физические параметры пластины и параметр k_1 связаны соотношением $16k_1 = q/(DR^3)$

Построенные решения качественно совпадают с численными решениями Л. И. Шкутина и уточняют известные приближенные аналитические решения [1–3].

В работе проведено исследование изгиба тонкой круговой пластины, находящейся под действием постоянной равномерно распределенной нагрузки гравитационного типа. При условии малости величины прогиба по сравнению с радиусом самой пластины построено уточненное приближенное аналитическое решение поставленной задачи с учетом геометрической нелинейности.

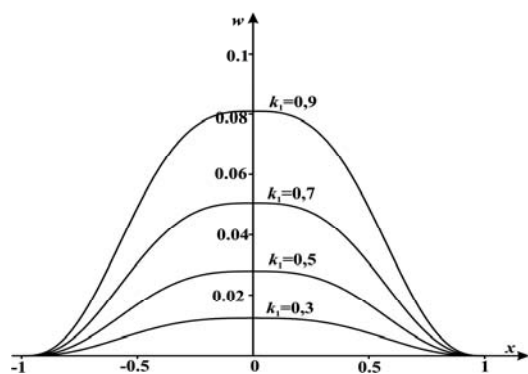


Рис. 2. Формы изгиба тонкой круговой пластины при различных значениях безразмерной нагрузки k_1 . Масштаб по осям 1:10

Библиографические ссылки

1. Рекач В. Г., Кривошапко С. Н. Расчет оболочек сложной геометрии. М.: Изд-во УДН, 1988. 176 с.
2. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
3. Феодосьев В. И. К расчету хлопающей мембраны // ПММ – 1922. Т. X, № 2. С. 295–300.
4. Шкутин Л. И. Численный анализ осесимметричных форм выпучивания радиально сжатой пластины //

Изв. Вузов / Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. Спецвыпуск: Нелинейные проблемы механики сплошных сред. Ростов н/Д: Изд-во Ростов. ун-та, 2003. С. 299–304.

5. Шкутин Л. И. Численный анализ осесимметричных форм выпучивания пластин при радиальном сжатии // ПМТФ – 2004. Т. 45, №1. С. 107–114.

6. Захаров Ю. В., Охоткин К. Г., Устойчивость тонкой круговой пластины при радиальном сжатии // ДАН – 2001 г. Т. 377, № 6. С. 764–768.

7. Алексеева Е. И., Горбунов А. И., Крамаренко Е. Ю., Левина Е. Ф., Райхер Ю. Л., Степанов Г. В., Столбов О. В. Деформация плоской мембраны из ферроэласти, закрепленной по ободу, в однородном магнитном поле // Зимняя школа по механике сплошных сред – 2007. Ч. 1. С. 31–34.

References

1. Rekach V. G., Krivoshapko S. N. *Raschet obolochek slozhnoy geometrii* (Calculation of shells of complex geometry). Moscow, Izd-vo UDN., 1988. 176 p.
2. Vol'mir A. S. *Ustoychivost' deformiruemykh system* (Stability of deformable systems). Moscow, Nauka, 1967. 984 p.
3. Feodos'ev V. I. *PMM*, 1922. vol. X, no. 2, pp. 295–300.
4. Shkutin L. I. *Izv. Vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki. Spetsvypusk: Nelineynye problemy mekhaniki sploshnykh sred*. Rostov-na-Donu, 2003, pp. 299–304.
5. Shkutin L. I. *PMTF*, 2004, vol. 45, no. 1, pp. 107–114.
6. Zakharov Yu. V., Okhotkin K. G. *DAN*, 2001, vol. 377, no. 6, pp. 764–768.
7. Alekseeva E. I., Gorbunov A. I., Kramarenko E. Yu., Levina E. F., Raykher Yu. L., Stepanov G. V., Stolbov O. V. *Zimnyaya shkola po mekhanike sploshnykh sred*, 2007, ch. 1. pp. 31–34.

© Захаров Ю. В., Охоткин К. Г., Пашковский А. В., Скоробогатов А. Д., Уваев И. В., 2013

УДК 802:378.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБУЧЕНИИ ИНОСТРАННЫМ ЯЗЫКАМ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Н. В. Ивлева, Е. В. Фибих

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

Рассматриваются новые методы повышения эффективности преподавания иностранных языков студентам технических специальностей с использованием информационно-коммуникационных технологий, а также их практическое применение на базе Ресурсного центра иностранных языков Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнёва. Внедрение информационно-коммуникационных технологий в учебный процесс основывается на языковой образовательной самостоятельности студентов, что способствует более продуктивному развитию языковой компетенции у студентов и будущих специалистов в определенной отрасли технических знаний в целом.

Ключевые слова: информационно-коммуникационные технологии, Интернет, информация, образование, дистанционное обучение, языковая компетенция, образовательная самостоятельность.

USE OF NEW INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES IN TEACHING FOREIGN LANGUAGES TO TECHNICAL STUDENTS

N. V. Ivleva, E. V. Fibikh

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

The article reveals new methods of effectiveness increase in teaching foreign languages to technical students using information and communication technologies and their practical implementation at the premises of the Foreign Languages Resource Center of Siberian State Aerospace University. Adoption of information and communication technologies to the educational process is based on students' independent language learning that encourages more productive development of language competences mastered by students and future specialists in a special area of technical knowledge as a whole.

Keywords: information and communications technologies, Internet, information, education, distance learning, language competence, independent learning.

In recent years in the field of education more and more importance is being attached to training of specialists capable of adapting to new tendencies in the world development and headlong growth in information and communications technologies (hereinafter referred to as ICT). Having a good command of a foreign language plays a significant role in this question due to the fact that in conditions of globalization and development of integration processes on various stages (economy, politics, culture) the language becomes the most important tool providing the successful adaptation in the society and demand as a specialist on the labor-market.

The quality of training in the field of foreign languages depends on plenty of factors: qualification of the teaching staff; quality of the training and methodological materials; material and technical basis; coordinated work of all involved departments [1].

The Krasnoyarsk territory still lacks for the generalists with good knowledge of foreign languages in their professional sphere and also highly skilled staff in the field of philology capable of training at all stages of foreign languages learning: school – institute of higher education – professional activity. It is stipulated not only by a large area of the Krasnoyarsk territory and remoteness of settlements from the territory center but also by the low quality of training and methodological materials and impossibility of getting competent consultation from a specialist in the field of philology and foreign languages training methods. This fact does not favor the image raise of the territory in contemporary conditions of globalization and internationalization of the world economical and political processes.

The formation of the United European Space of higher education, initiated by signing the Bologna Declaration, led to serious reappraisal of approaches to aims and objectives realized by the existing system of educational institutes. In this connection one of the main objectives of Russian higher professional education is staff training for new generation – specialists having fundamental grounding and actively reacting to changes on the labor-market. The question arose more crucially about the

language training of the higher school staff – scientists, engineers and technicians who are called to develop and hasten the technical progress. Knowing a foreign language as a tool of the professional activity can and even must improve chances of the Russian specialists on the world labour-market. This activity includes contacts with foreign colleagues, acquaintance with the contemporary world achievements and their usage in the professional practice.

Nowadays, in the information-oriented society foreign languages teachers have new effective training tools about which it was possible to dream only before – ICT. The advantages of ICT adoption are, firstly, acceleration of knowledge transmission and accumulated technological and sociological human experience not only from generation to generation but also from one man to another; secondly, contemporary ICT increasing the quality of teaching and education allow people to adapt to the environment and social changes more successfully and quickly. It gives every person a possibility to get necessary knowledge at present and in the future information-oriented society; thirdly, the active and effective adoption of these technologies in education is an important factor for creation of the educational system meeting the demands of the information-oriented society and process of traditional educational system reformation in the light of demands of the contemporary society.

The main advantage of new ICT adoption lies in expanded access to education, the system of open education formation, creation of job descriptions for contemporary specialists. The aim of ICT adoption for teaching foreign languages on the basis of Foreign Languages Resource Center of SibSAU on the contemporary stage is the development of the students' communicative competence, ability to intercultural communication and use of a foreign language as a tool of this communication [7], also the development of the linguistic independence in the educational process which would favor the further perfection of intercultural communication and increase the level of cognitive activity via learning a foreign language. The basic

objectives of ICT adoption for teaching foreign languages on the basis of Foreign Languages Resource Center of SibSAU are the increase of the specialist training quality by means of using contemporary ICT in the educational process; use of active teaching methods and, as a result, increase of creative and intellectual components of training activities; integration of different kinds of the training activity (studying, research, etc.); adaptation of information technologies to individual features of students; continuity and succession provision in learning; development of information technologies for distance learning; improvement of program and methodological materials for the educational process.

According to the aim of the Foreign Languages Resource Center of SibSAU and experience in teaching foreign languages in a non-linguistic institute of higher education not only should a specialist possess developed communicative but also intercultural competence to behave in situations of intercultural communication without any difficulty, take part in them and decide the issues. «...ability of an individual to fulfill himself in conditions of intercultural interaction» (Galskova et al, 2005, p.18), which supposes, first of all, the development of students' linguistic independence in the educational process, favoring the further perfection in intercultural communication and cognitive activity via learning a foreign language.

There are quite a lot of ways to develop students' education linguistic independence, however, not all of them meet the needs of contemporary students and reveal all their possibilities in learning foreign languages. According to tutors-researchers of this problem there were lots of ways for developing this kind of independence tested. Some ways, the basis of which is ICT as the most effective tool of learning foreign languages, were selected and joined in one group.

One of the most valid tools of students' educational linguistic independence development involving ICT is courseware adoption for the educational process. There are a number of various approaches to classification of courseware but there is no common opinion and, consequently, common classification. This courseware can be classified being based on aims and objectives of the courseware or modes of using it: illustrating, consulting, operational environment, simulators, training examination; also it is possible to classify it being based on the analysis and generalization of different classifications: training, tutorial, problem-solving, imitating and modeling, playing. All mentioned classifications of the courseware can be referred to three forms: electronic textbooks, automated courseware, testers. Adoption of any form for the educational process defines the level of students' independence.

Use of electronic textbooks stimulates mastering the educational course or its sections with the help of a tutor or without. An electronic textbook can be tended for independent learning or lecture support with the view of advanced study. The textbooks of this kind can be used by students while learning their special subjects in English. In connection with integration of processes in the society

interdisciplinary connection plays an important role thanks to which it is possible to study one subject via another, in this case studying special subjects via foreign languages.

Automated courseware is a complex of scientific, methodological, training and organizing support for the educational process which is based on information technologies. Nowadays, thanks to automated courseware it is possible to solve some problems of education.

The first group can represent the problems related to the knowledge level, abilities, skills examination of students before and after education, finding out individual features, inclination and motivation. For such examination special psychological test systems and examination questions are used. The problems concerning students' capacity for work are solved by means of identification of a promptitude, level of attention, etc.

The second group of problems is connected with registration and statistical analysis of indexes referred to mastering training material: establishment of individual sections for every student, definition of the time limit for completing the objectives, definition of the total quantity of mistakes, etc. It is also logical to relate objectives concerning training activities management. Thereby, this group of problems is aimed at supporting and realizing basic elements of programmed training.

The third group of problems is connected with material preparation, its adaptation for different levels, presentation to students and preparation of dynamic illustrations, tasks, laboratory works and tests.

Hardware for this automated courseware is founded on local area networks including automated workplaces for students, tutors and circuits between them. The workplace for a student except for a monitor and keyboard can have a printer, multimedia elements such as speakers, voders, word processors and graphics editors. The aim of these hardware and software consists in supplying students with tools for problem-solving, reference materials and answer logging.

Automated courseware use in teaching foreign languages is also the way of linguistic independence development. The adoption of such ware to the educational process can help track students' training material mastering and also support students' independence on a tutor. Thanks to the ware of this kind it is possible to keep balance between students' independence and activity control.

Testers are related to the courseware too. The programs are developed with the help of a tutor for the purpose of facilitating the examination in course sections. However, it is worth paying attention to the fact that any test as an instrument should be defined by the reliability and validity indexes. Before having a test a tutor should know to what extend the test meets the abovementioned needs. The shells of many testers are developed in the following way: a tutor without special education in information technologies can make tests in an electronic form, testing them in some groups of students. Examination of this kind can simplify the check-up of completed tasks and also improve the estimation

objectivity. This examination is typical for taking exams on the international level. The example is international exams in the English language such as KET, PET, BEC, TKT, etc. which are set up by the Cambridge University Examining Board. For such exams the specific shells are installed into the site by means of which testing is organized. This form of examining is convenient for both a tutor and a student. Especially, if the test centers are far away from each other and the central office.

Thereby, it became possible to use this courseware for classroom and independent activities, examination. It improves the level of educational linguistic independence and motivation for learning foreign languages.

Electronic libraries are considered to be one more effective way for developing educational linguistic independence with the view of searching for authentic materials for completing different tasks while learning foreign languages.

Though, it is necessary to notice that before offering students to use the resources from the electronic libraries a tutor should analyze the resources of these libraries himself. The analysis can be performed with the help of the criteria for assessing educational networks, developed by the methodologist Shapiro K.V. from St. Petersburg. These criteria were developed in accordance with all parameters of electronic resources, consequently, analyzing them it is possible to be sure in the quality of resources which are offered to students. Nevertheless, for increasing the level of independence not only can students find appropriate materials in the selected libraries but also they can analyze the resources according to the same criteria to choose a good one.

One more way for developing students' linguistic independence is adoption of the project activity to special subjects in a foreign language with the help of ICT. In this activity it is possible to track the interdisciplinary connections between special subjects, information technologies and also a foreign language.

In terms of experience success in teamwork of students and tutors depends on organization of the activity. It is known that during the classroom work a tutor is more active than students while the students' activity appears in organization of independent work. The most actual problem for tutors is to organize independent activity to improve students' motivation. As the language is the means of communication and the speech is the way for this communication [9], mastering the tools is possible only in conditions of educational problem-solving situations. It means that it is necessary to define lessons where students use the tools for communicative tasks and lessons where they learn how to use these means in the training system [4]. Teaching communication is the interaction with a tutor in the frame of communicative cooperation. It is better to do preparatory work for this interaction, completing routine tasks, in the form of independent work. Linguistic tools should be mastered in the context of independent activities. Consequently, the center of physiological and pedagogical work should be focused on creating favorable conditions for students [8].

The questionnaire and interview of students showed that the process of getting experience in communication with a foreign culture demands the situations for practical language use as an instrument for intercultural knowledge and interaction. In connection with abovementioned facts it became objective to integrate such information technologies in the educational process which would allow to involve students in intercultural communication. Nowadays, the global network Internet presents a good range of possibilities for students' entry into authentic intercultural interaction with representatives from foreign countries; under such conditions the factor of no small importance is using low-cost technologies in teaching foreign languages.

On the basis of the foreign experience in teaching foreign languages using new information technologies [5] and ICT applied in the higher school of Russia there were synchronous communication tools and asynchronous communication tools adopted.

Synchronous communication tools are the Internet tools which allow communicating in real time (chat, video chat and audio chat). The examples of such tools which provide synchronous communication by means of chat, voice and video connection are Skype и Yahoo Messenger: <http://www.messenger.yahoo.com>, <http://www.skype.com>. Yahoo messenger and Skype users have the chance to determine immediate voice and video connection with a receptionist locating in any place in the world having these programs or communicate via chats. Also the programs allow to create a list of friends and invite them for a face-to-face chat or organize a conference, a group chat as it is called, set parameters of the search (age, sex, place of abode, mother tongue, interests, etc.) and find friends in the cyberspace.

These chat platforms open up new possibilities in teaching foreign languages. Using chats and voice connection is a good way of having lessons with students from other countries in the form of projects; discuss problems with competent representatives of other countries; offer original tasks. For example, for making first linguistic contacts with native speakers, having set parameters of an interlocutor, use the program, find an interlocutor in a certain country. It is a great chance to learn his name, interests, tell him about yourself, etc. and thanks to the function of chat text archiving it is possible to analyze the chat log from the point of grammar, vocabulary, punctuation, stylistics, speech mistakes, etc. and arrange new forms of lessons. Although these means of the Internet communication appeared not for a long time ago, in the world practice there is certain experience of their use in the educational process. Daphna Gonzalez, professor of Simon Bolivar University in Caracas, Venezuela, selected 5 types of the pedagogical chats: free topic chats; collaborative task-oriented chats; academic seminar or presentation chats; practice chats [3].

Asynchronous communication tools are the Internet tools which allow information exchanging with time delay (blogs, forums, educational portal, electronic and voice mail, web-sites, wiki, etc.).

Blog is a journal or diary written for public viewing on a website and consisting typically of personal reflections, commentary on current events, etc. arranged chronologically. Blogs can be updated daily / weekly / monthly. The developer of a blog has got the right to allocate information in his blog and edit it while the guests of the blog have got the right to comment on the articles only. A developer can allocate photographs, audio and video materials, web-links, etc. in his blog. Eron Campbell selected 3 types of blogs used in teaching foreign languages: the tutor blog, for example, <http://juliayats.blogspot.com>; the class blog; the learner blog [6].

Among blogs there is a special type of them – audio blogs or as they are called podcasts. The English word Podcast came from the words i-Pod (MP3 player) and broadcast. Audio blogs / podcasts are the network diaries but with MP3 files. Podcasting is creation and distribution of MP3 files in the Internet which can be listened on-line or loaded in a MP3 player. There are various types of podcasts: authentic podcasts, files with recorded native speech, for example, <http://www.podcastsinenglish.com>; podcasts developed by tutors for students; students' podcasts, for example, <http://juliay.podomatic.com>. Audio blogs open up great possibilities: any student may record his speech on the site using site tools and also allocate wave files, recorded in other programs, for example, Audacity and HandyBits or load from a CD but in the MP3 format.

Forum, originally a Latin word, currently refers in English to a place or a space for meeting or for trading. An Internet forum, also known as a message board or discussion board, is a web application that provides for online discussions, and is the modern descendant of the bulletin board systems and existing Usenet news systems that were widespread in the 1980s and 1990s. An Internet forum typically exists as part of a website and invites users to start topics and discuss issues with one another. Sometimes, a forum even comprises most, if not all, of the content of a site.

Compared to wikis, Internet forums don't allow users to edit the forum posts of other users; however, administrators and moderators generally have the capability of doing this. Internet forums differ from weblogs. The forums generally allow most users to post topics, while blogs only allow one or a few users to create entries. Forums also tend to be more diversified in interest, while blogs tend to be more specific to a certain topic or a subset of beliefs.

By means of Chinswing (<http://www.chinswing.com>), Gabmail (<http://www.freegabmail.com>) and Vaestro (<http://www.vaestro.com>) it is possible to arrange forums in foreign languages for Russian students and native speakers. In these forums different topics, exciting students, would be discussed, friendly relations would be established, speaking skills would be practiced.

Foreign Languages Resource Center of SibSAU gave an opportunity for tutors of foreign languages, students and inhabitants of Krasnoyarsk and Krasnoyarsk territory who are interested in languages and cultures to use all

new methods and technologies in teaching and learning foreign languages on the international level.

Cooperation with company Microsoft enabled tutors and students to get access to the education portal Live@edu, adopt and use it as an international educational net which permitted them to work with native speakers in an interactive mode.

Foreign Languages Resource Center developed the unique English and German electronic catalogue "Cat.edu" which includes full-text materials in categories: business and management, foreign languages for specific purposes, intercultural communication, linguistics, exam preparation materials, methodology, study skills, reference books, country study, fiction; courseware, video and audio material.

The center cooperates with publishing companies which present up-to-date literature. In the center it is possible to get access to full-text authentic documents, the newest researches and publications, materials for information and linguistic supply, authentic sources in the field of contemporary researches, collected in a catalogue. This access helps make up for the lack of information in the field of foreign languages for specific purposes and also helps be the support for more qualitative systems of professional training, retraining and professional development for the faculty, students, schoolchildren and everyone who wishes to learn languages.

Integration of ICT (Skype, Yahoo Messenger, Electronic Mail Service, chats, blogs, educational social nets, video conferences, etc.) in the educational process allows to solve a range of didactic problems more effectively: formation and improvement of reading, writing, speaking and listening skills; dialectic statement skills; active and passive vocabulary, moreover, students can find opportunities to get to know with sociocultural reality of a foreign language (speech etiquette, features of speech behavior and culture, traditions of foreign countries) and raise motivation for foreign activities on the basis of authentic materials and principles connected with the real life.

ICT open up possibilities for direct authentic communication between speakers. These new possibilities cannot be compared with traditional forms of work because of their diversity, transfer rate, special independence and content. They actively involve students in a linguistic environment and help get over the language barrier, encourage topic discussions in a foreign language outside regular hours with native speakers in real time and with time delay, stimulate creative activity, motivate for learning foreign languages and cultures, improve communicative and intercultural competences and also familiarize students with net resources which offer a lot of interesting and useful information for problem-solving tasks during lessons.

However, it is necessary to offer all facilities for learning. The facilities by means of which students feel their progress, intellectual consistency and make the process of learning more productive.

Independent information search is a constituent part of the creative process which livens up the intelligence

activity of individuals. The search at the moment of the concept appearance can stimulate the concept development and prevent from its disappearance. ICT make people solve different problems in a new way, change the way of thinking. Surfing the Internet students feel themselves as parts of the “teaching” family, where people speak different languages. This fact impels students to learn more than one foreign language.

Integration of ICT in the educational process leads to reconsideration of a teacher’s role and place in this process. The basic objective of this process is not knowledge transmission or ability and skill formation but interest encouragement, motivation for language learning, help in adoption and creative research. Nowadays, relations with students are built on principles of cooperation and joint search and creativity.

In these conditions it is inevitable to reconsider and review present forms, principles and methods of teaching: there are tendencies in independent work and team work increase, deviation from traditional forms of lessons, illustration methods use in teaching, increasing the volume of practical and creative work with searching and research features. Internet technologies are called to favour the development of the individual educational paths: to adapt the educational material to individual features of students, their level of knowledge and abilities.

Having studied the problem of using ICT in teaching foreign languages it is possible to state that the linguistic community having understood the potential of ICT actively develops the ways of increasing the effectiveness in teaching foreign languages in non-linguistic institutes

of higher education and according to the experience ICT use in teaching raise the level of quality and preparation of future specialists.

References

1. Chuchalin A. I., Veledinskaya S. B., Royz S. S., Okhotin I. S. “Modeling Process of Foreign Training in the Institute of Higher Education from the Point of Quality Management”, *Engineering Education*, 3 (2005).
2. Galskova N. D., Gez N. I. “Foreign Languages Teaching Theory” (Moscow, 2005).
3. Gonzalez D. “Teaching and Learning through Chat: a Taxonomy of Educational Chat for EFL/ESL”, *Teaching English with Technology*, 4 (2003).
4. Mashbits E. I. “Computerization of Education: Problems and Perspectives” (Moscow: Pedagogy, 1986).
5. Polat E. S. “Some Conceptual Regulations for Foreign Languages Distance Teaching on the Basis of Computer Technologies”, *Foreign Languages at School*, 5 (1998), pp. 6–11.
6. Stanley G. “Blogging for ELT” (Barcelona: British Council, 2005).
7. Sviridon R. A. “Intercultural Education in Contemporary Conditions”, *Actual Problems in Teaching Foreign Languages at Schools and Universities*, ed. by V.I. Petrishev (Krasnoyarsk: KSPU, 2008), pp. 9–11.
8. Tyukova A. A. “Problem-solving tasks in professional training of students”, *Problem-solving Education in the Institute of Higher Education* (Moscow: Knowledge, 1986).
9. Zimnyaya I. A. “Psychology of Teaching a Foreign Language” (Moscow : Russian Language, 1989).

© Ivleva N. V., Fibikh E. V., 2013

УДК 629.7.05

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ТРАНСФОРМИРУЕМЫМИ УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КОНСТРУКЦИИ

М. Г. Игнатьев, В. М. Копылов, А. Ю. Кулаков, М. В. Сотников

ФГУП «КБ «Арсенал»

Россия, 195009, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, д. 1-3. E-mail: michigna@mail.ru

Представлен программный комплекс, используемый для моделирования движения КА с активной системой управления движением (СУД). Комплекс предназначен для оценки функционирования СУД, определения влияния изменения технических характеристик приборов и исполнительных органов СУД, а также для проверки правильности определения коэффициентов управления с учетом упругости конструкции КА. Рассматриваются алгоритмы расчета упругих колебаний, смещений узловых точек гибких элементов, а также расчета сил и моментов от аэродинамического и светового давления.

Ключевые слова: система управления движением, математическая модель КА, протяженные упругие элементы конструкции.

PROGRAM COMPLEX FOR MODELING OF STABILIZED MOTION OF SPACECRAFT WITH TRANSFORMABLE FLEXIBLE PARTS

M. G. Ignatyev, V. M. Kopylov, A. J. Kulakov, M. V. Sotnikov

Federal State Unitary Enterprise "Design Bureau "Arsenal"
1-3 Komsomola str., 195009, St. Petersburg, Russia

The presented program complex is designed for modeling of the movement of spacecrafts with active movement control system (MCS). The complex serves to estimation of MCS functioning, evaluation of the influence of change of technical characteristics of the devices and executive elements of MCS and check of the guidance factors management according to the flexibility of spacecraft construction. The authors consider calculation algorithms of elastic oscillations modeling, shifts of flexible elements, as well as forces and the moments from the aerodynamics and light pressure.

Keywords: movement control system, computer model of spacecraft, long flexible elements of constructions.

Основными задачами разработанного программного комплекса являются проведение моделирования динамики движения КА на различных участках функционирования и оценка качества работы его СУД. Часто требуется рассматривать протяженные участки функционирования КА, длительность полёта по которым, в зависимости от выбранной орбиты, может составлять сутки и более. Для увеличения быстродействия программного комплекса математическая модель КА была представлена в виде «сборки», состоящей из жесткого центрального тела и нескольких упругих выносных элементов (УВЭ), описываемых матрицами собственных частот колебаний и коэффициентов демпфирования, а также матрицами инерционных связей с корпусом.

Протяженные выносные элементы современных КА, как правило, можно представить в виде упругой системы, жестко закрепленной в одной точке – месте установки привода раскрыва или перекладки. При наличии нескольких приводов с гибким валом их можно представить как набор отдельных УВЭ, с одной точкой закрепления. Корпус КА, как правило, является жесткой конструкцией, и его колебаниями по сравнению с колебаниями выносных элементов, можно пренебречь. Сделанные допущения позволяют по конечно-элементной модели конструкции УВЭ получить их динамические характеристики – матрицы динамических связей относительных перемещений с силами и моментами, действующими в точке закрепления (матрицы b и a соответственно).

Частотный анализ и получение матриц форм колебаний производится в среде COSMOS-M, реализующей конечно-элементные модели тел. По результатам этого анализа получены матрицы a и b связей перемещений узлов УВЭ с моментами и силами в точке закрепления.

С использованием матриц динамических связей основные уравнения движения КА с учетом упругости его конструкции записываются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d(\mathbf{J} \times \boldsymbol{\omega})}{dt} + \sum_i A_i \cdot \ddot{q}_i + \sum_i C_i \cdot \dot{\phi}_i &= M_{\Sigma} \\ m \cdot \ddot{u} + \sum_i B_i \cdot \ddot{q}_i + \sum_i D_i \cdot \dot{\phi}_i &= F_{\Sigma}, \quad i = 1 \dots N \end{aligned} \quad (1)$$

где N – число УВЭ в модели; $\mathbf{J}$ – тензор инерции; m – масса КА; $\boldsymbol{\omega}$ – мгновенная угловая скорость КА; u – линейная скорость КА; M_{Σ} , F_{Σ} – суммарные сила и момент, действующие на КА; ϕ_i – вектор углов разворота УВЭ; A_i , B_i , C_i , D_i – матрицы, учитывающие связь между жесткостью УВЭ и реакциями в местах их закрепления; q_i – вектор обобщенных координат колебаний УВЭ. Два основных динамических уравнения (1) дополняются уравнениями колебательного движения (2), позволяющими определить вектор q для каждого упругого элемента:

$$\begin{aligned} (\ddot{q}_i + \omega_i \cdot v_i \cdot \dot{q}_i / \pi + \omega_i^2 \cdot q_i) + \\ + A_i^* \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}} + B_i^* \cdot \dot{u} + G_i \cdot \ddot{\phi}_i = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где ω_i – диагональная матрица собственных частот колебаний; v_i – диагональная матрица логарифмических декрементов затухания для каждой из частот колебаний.

Матрицы A и B в уравнениях (1), (2) получаются преобразованием матриц динамических связей в систему координат корпуса КА:

$$B = H^T \cdot b, \quad A = H^T \cdot a + \mathbf{r}_i \times B, \quad (3)$$

где H – матрица перехода от системы координат корпуса КА в систему координат УВЭ; $\mathbf{r}_i$ – радиус-вектор точки закрепления УВЭ в системе координат корпуса КА. Векторное произведение вектора на матрицу понимается как та же операция над каждым столбцом матрицы как над вектором.

Полученные дифференциальные уравнения движения (1) решаются методом Рунге-Кутты 4-ого порядка, а уравнения колебательного движения (2) – явным интегрированием на каждом шаге. Возможность решения уравнений (2) явным методом даёт дополнительный выигрыш производительности программного комплекса. Для полного использования ресурсов современных многоядерных процессоров решение уравнений (2) для каждого УВЭ выполняется в отдельном процессе, что позволяет загрузить все ядра на 100 % (в отличие от частичной загрузки, характерной для однопоточных приложений).

В программе предусмотрена возможность визуализации колебаний отдельных УВЭ или получения

графиков смещения для конкретных узлов. Обобщенные координаты колебаний каждого элемента конструкции могут быть переведены в перемещения его узлов U_i с помощью матриц XI_i $[6 \times n]$, строки которых соответствуют перемещениям узла под действием единичной силы (элементы матрицы X), а столбцы – модам колебаний

$$U_i = XI_i \cdot q \quad (4)$$

Пример визуализации деформаций (смещения узлов сетчатого рефлектора) приведен на рисунке.

Протяженные элементы конструкции зачастую имеют большую площадь поверхности, обуславливающую действие аэродинамических моментов и моментов светового давления. Для КА, управляемых высокоточными гироскопическими системами, величина этих моментов (а точнее, их интеграл во времени – приращение кинетического момента) может быть существенной. При переориентации УВЭ (например, солнечных батарей) аэродинамические коэффициенты КА изменяются, таким образом учет воздействия атмосферы и светового потока от Солнца с помощью обобщенных аэродинамических коэффициентов затруднен. В математической модели движения используется модель диффузного отражения частиц атмосферы и фотонов, учитывающая свойства поверхностей КА. Каждая поверхность задается набором треугольников (для аппроксимации окружностей применяется 32-угольник). Каждая элементарная треугольная площадка имеет свои коэффициенты поглощения и отражения. Число площадок в модели не очень велико, порядка нескольких сотен для КА с большим числом поверхностей вращения, и нескольких десятков для КА с элементами в форме многогранников (одна грань куба представляется двумя площадками). Учет затенения площадок производится по следующему алгоритму.

Весь набор элементарных площадок (меш) проецируется в картинную плоскость XU , при этом ось Z направлена вдоль вектора давления потока. Далее меш разбивается на подплощадки равной величины (воксели), проекция которых на картинную плоскость представляет собой квадрат. Каждый воксель харак-

теризуется своими дискретными координатами на картинной плоскости и глубиной центра – Z . Кроме того, он получает свойства поверхности и нормаль той элементарной площадки, к которой принадлежал его центр до разбиения. Условие при котором воксель участвует в расчете силы и момента:

$$\left(\vec{N}_{i+1} \cdot \vec{V} < -\cos \frac{\pi}{32} \right) \wedge [Z_{i+1}(X, Y) < Z_i(X, Y)]. \quad (5)$$

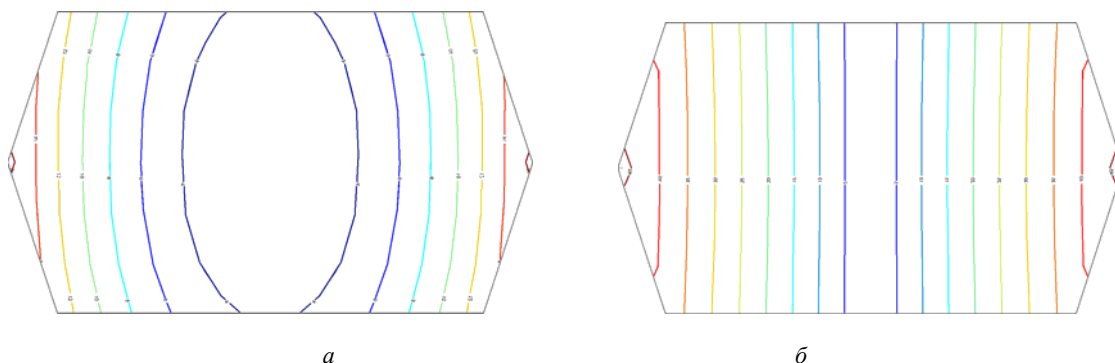
Первое из условий гарантирует учет только тех вокселей, которые обращены к потоку лицевой стороной, и одновременно исключает из расчета воксели, обращенные к потоку «почти ребром» – при дискретной схеме деления меша площадь таких поверхностей будет стремиться к бесконечности, что приведет к существенным ошибкам в расчете. Второе условие означает выборку вокселей с минимально Z -координатой. После суммирования сил и моментов, приложенных к каждому вокселю, получим силу и момент, действующие на весь КА.

Таким образом, программный комплекс позволяет моделировать работу СУД и движение КА различной конструкции без выполнения дополнительных аэродинамических расчетов и расчетов упругих колебаний. Загрузка исходных данных организована таким образом, что позволяет проводить расчеты пользователям различной квалификации.

Структура программного комплекса «ММДКА-Лиана» представляет собой набор модулей, содержащих описание математических моделей КА, внешних воздействий, СУД и режимов функционирования КА. Модульный принцип построения программного комплекса позволяет легко модифицировать состав бортовой аппаратуры, конструкции КА, а также состав бортовых программ.

Результаты моделирования отображаются в трех формах:

- трехмерное визуальное отображение движения КА;
- графическое отображение выбранных переменных, описывающих движение КА или работу бортовых систем;
- текстовые файлы с фиксацией основных событий или выбранных переменных.



Линии равных деформаций поверхности рефлектора

a – смещения вдоль поверхности рефлектора; b – смещения вдоль оси рефлектора

Использование современного языка программирования (C++) и оптимальных алгоритмов расчета позволяет достичь существенного ускорения при расчете динамики орбитального КА с учетом возможных колебаний выносных элементов. Так, при обсчете 58 мод колебаний при средней точности с помощью процессора с тактовой частотой 3.33 GHz (четыре ядра), время расчета опережает реальное в 60 раз. При наибольшей точности время расчета опережает реальное в 12 раз. Планируется дальнейшее повышение производительности программного комплекса, что может быть достигнуто с помощью использования технологии NVidia CUDA параллельных вычислений на графических картах.

Библиографические ссылки

1. Белецкий В. В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. М. : Наука 1965. 416 с.
2. Обморшев А. Н. Введение в теорию колебаний. М. : Наука 1965. 278 с.
3. Руководство пользователя COSMOS/M для UNIX, Windows NT и Windows 95. Версия 1.75, 1996. 448 с.

4. Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1974. 600 с.

References

1. Beletskiy V. V *Dvizheniye iskusstvennogo sputnika otноситel'no tsentra mass* (Motion of an artificial satellite with respect to the center of mass). Moscow : Nauka, 1965, 416 p.
2. Obmorshev A. N. *Vvedeniye v teoriyu kolebaniy* (Introduction to the theory of vibrations). Moscow : Nauka, 1965, 278 p.
3. *Rukovodstvo pol'zovatelya COSMOS/M dlya UNIX, Windows NT i Windows 95*. (User's Guide COSMOS / M for UNIX, Windows NT and Windows 95). Version 1.75, 1996, 448 p.
4. Raushenbakh B. V., Tokar' Ye. N. *Upravleniye oriyentatsiyei kosmicheskikh apparatov*» (Attitude control of spacecraft). Moscow, Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1974, 600 p.

© Игнатьев М. Г., Копылов В. М., Кулаков А. Ю., Сотников М. В., 2013

УДК 621.396

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ*

И. Н. Карцан, К. Г. Охоткин, Р. В. Карцан, Д. Н. Пахоруков

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

Стремительно развивающиеся радионавигационные системы (РНС), как в России, так и за рубежом, становятся неотъемлемой частью в жизнедеятельности, как государства в целом, так и любой структурной единицы в нем. В результате чего у потребителей РНС возрастает потребность в качестве обслуживания связью, безопасности, функциональности, в экономии ее приобретения и использования. Поэтому целью данной работы является исследование, и качественный анализ эффективности применения радионавигационных систем.

В работе изложены основные задачи развивающейся радионавигационной системы, а также возможные пути их решения. Представлена обобщенная блок-схема основной связи показателей РНС (экономических, технико-эксплуатационных, функциональных). По результатам данной работы предложен способ исследования и оценка эффективности применения радионавигационных систем при их комплексировании с иными навигационными средствами

Ключевые слова: радионавигационная система, комплексирование, эффективность, точность определения координат.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.514.11.4092 от 21 июня 2013 г.

EFFECTIVENESS OF RADIO-NAVIGATION SYSTEMS

I. N. Kartsan, K. G. Okhotkin, R. V. Kartsan, D. N. Pakhorukov

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

The rapidly developing radio-navigation system (RNS), in Russia, as well as abroad, becoming an integral part in the life of the state as a whole, as well as of any structural unit in it. As a result, the consumers of RNS increase the demand for quality of communication service, security, functionality in the cost of its purchase and use. The aim of this work is the study and the qualitative analysis of the effectiveness of use of radio navigation systems. The paper describes the main challenges of RNS, as well as possible solutions. A generalized block diagram of the basic communication performance of RNS (economic, technical, operational, functional) is presented. On the basis of the results of this paper the authors propose a method of research and evaluation of the radio navigation systems in combination with other navigation means.

Keywords: radio-navigation system, aggregation, efficiency, accuracy of definition of coordinates.

Уровень радионавигации к концу XX в. таков, что практически любые задачи навигационного обеспечения могут быть решены различными видами радионавигационными системами (РНС), при их комплексировании с иными навигационными средствами или без него. Выбор предпочтительного варианта, как правило, неоднозначен и окончательно возможен только на основе системного анализа задач и средств навигационного обеспечения. Общий алгоритм решения подобных вопросов следующий:

- выделить существенные стороны объектов управления, способные повлиять на возможность и результативность радионавигации;

- на основе исследования методов радионавигации и характеристик РНС установить ограничения на применение тех или иных их вариантов, вытекающие из требований к навигационному обеспечению и условий его реализации;

- путем анализа эффективности РНС на множестве допустимых вариантов выбрать оптимальное решение.

Исходя из задач повышения безопасности и эффективности транспортных перевозок, учитывая внедрение в мировую практику перспективных стандартов по точности выдерживания навигационных характеристик, возросли требования основных групп потребителей к радионавигационным системам.

Так, например, для большинства подвижных транспортных средств требуется точность навигационных определений (СКП) в среднем от 1 до 100 м. Такие требования как доступность и целостность потребителями автомобильного, речного транспорта и рыболовного флота ранее не выставлялись, а сейчас показатели по этим параметрам соответственно должны быть 0,95...0,999 и 0,9...0,99.

Практически все транспортные потребители считают необходимым обеспечение требуемых навигационных характеристик, как на территории Российской Федерации, так и при движении по международным маршрутам [1].

Анализ и оценка действий правительственных структур различных государств в области радионавигации, подтверждает вывод о том, что международное

сообщество в ближайшем будущем не признает космические навигационные системы в качестве единственного средства навигации. Объявленные в конце 90-х гг. стратегические цели администрации США – удовлетворить требования всех потребителей навигационно-временного обеспечения только с помощью системы GPS и до 2010 г. вывести из эксплуатации все наземные радионавигационные системы, оказались невыполнимыми [2].

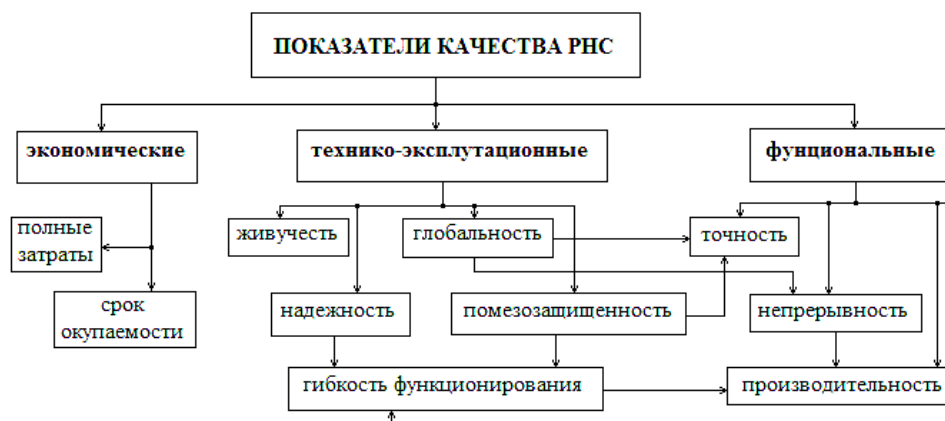
Наибольшую трудность представляет исследование эффективности многофункциональных глобальных РНС, назначение которых предусматривает международное использование.

Эффективность сложных систем, к которым относятся современные РНС дальнего действия с наземными радионавигационными точками и спутниковыми РНС, есть обобщенная характеристика свойств системы, отображающая полноту и качество решения поставленных задач в заданных условиях применения с учетом экономических затрат. Существует потребительский, технический и экономический аспекты исследования эффективности представлено на рисунке.

При этом потребительский или функциональный аспект предполагает рассмотрение эффективности как показателя результата реализации целевых свойств системы, ее соответствия назначению. Это позволяет оценить целесообразность применения РНС для решения определенного круга задач. Основными исходными данными здесь являются свойства объекта навигации, влияющий на состав, потенциальную точность, глобальность и оперативность навигационных определений.

Технический аспект исследования эффективности связан с оценкой технико-эксплуатационных свойств РНС, определяющих качество ее функционирования в заданных интервалах времени и параметров условий окружающей среды [3]. Здесь используют такие показатели качества РНС как надежность, живучесть, помехоустойчивость.

Экономический аспект предполагает оценку потребительской стоимости навигационной информации и других услуг, предоставляемых РНС и, в конечном счете, рентабельности системы.



Связь показателей качества РНС

Эффективность РНС исследуется и оценивается по двум схемам: замкнутой и разомкнутой. По замкнутой схеме эффективность оценивают с использованием показателей эффективности операций, выполнение которых обеспечивается посредством РНС.

При использовании замкнутой схемы в явной форме отражается назначение РНС, однако трудно получить исходные количественные данные по результативности решений всего многообразия задач потребителей. Кроме того, замкнутая модель в силу необходимости учета множества факторов, не относящихся собственно к РНС, затрудняет детальный анализ качества ее функционирования. Поэтому для углубленного анализа влияния всевозможных факторов в интересах разработки и совершенствования РНС предпочтительнее разомкнутая схема. В данной схеме эффективность оценивается по качеству решений частных задач, составляющих процесс навигационных определений.

Рассмотрим вариант оценки эффективности многоцелевой РНС по разомкнутой схеме.

Первоначально задается множество $C = \{C_j\}$ целевых задач, которые могут быть решены с использованием сравниваемых вариантов РНС, $j = 1, 2, \dots, J$ – число задач. Методом экспериментальных оценок, задаются коэффициенты значимости задач $K = \{K_j\}$. Далее определяется значения показателей эффективности $\mathcal{E}$ при наличии системы-объекта $\mathcal{E}_{pn}$ (n – номер варианта) и без ее использования $\mathcal{E}_o$. Затем находят относительное приращение эффективности по всем целевым задачам

$$\Delta\mathcal{E}_{nj} = (\mathcal{E}_{pnj} - \mathcal{E}_{oj}) / \mathcal{E}_{oj} \quad (1)$$

и вычисляют значения показателя эффективности, суммарное по множеству целевых задач РНС

$$\mathcal{E}_{n}^{сум} = \sum K_j \Delta\mathcal{E}_{nj} \quad (2)$$

Для глобальных РНС, включая системы спутниковой радионавигации, частным, но практически важным показателем эффективности может служить математическое ожидание относительной площади земной поверхности, в пределах которой точность навигационных определений отвечает совокупности наиболее значимых потребителей

$$\mathcal{E}_n^{cp} = S_{Tn}^{cp} / S \quad (3)$$

где S_{Tn}^{cp} – средняя за некоторый интервал времени площадь поверхности Земли, с которой потребитель может проводить определения по n -ному варианту РНС с необходимым качеством, в данном случае точностью; S – общая площадь земной поверхности.

Библиографический список

1. Радионавигационный план Рос. Федерации : утв. приказом Министерства промышленности и торговли РФ от 2 сентября 2008 г. № 118 : в редакции приказа Министерства промышленности и торговли РФ от 31 августа 2011 г. № 1177. [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Царев В. М. Пути повышения эффективности радионавигационных систем дальней навигации наземного и космического базирования при их комплексном применении : дис. ... канд. техн. наук. М., 2005.
3. Дифференциальная коррекция погрешностей определения координат при геомагнитных возмущениях / И. Н. Карцан, В. Н. Тяпкин, К. Г. Охоткин и др. // Вестник СибГАУ. 2013 № 2(48). С. 128–133.

References

1. Radionavigational plan of the Russian Federation : approved by the government. order of the Ministry of industry and trade of the Russian Federation from September 2, 2008, № 118 in the wording of order of the Ministry of industry and trade of the Russian Federation dated August 31, 2011 № 1177.
2. Tsarev V. M. *Puti povysheniya effektivnosti radionavigatsionnykh sistem dal'ney navigatsii nazemnogo i kosmicheskogo bazirovaniya pri ikh kompleksnom primenenii*. Dis. ... kand. tekhn. nauk (Ways to improve the efficiency of radio navigation systems long range navigation ground-based and space-based with their complex application. Thesis for the degree of candidate of Sciences). 2005.
3. Kartsan I. N., Tyapkin V. N., Okhotkin K. G., Kartsan R. V., Pahorykov D. N. *Vestnik SibGAU*. 2013, no 2(48), p. 128–133.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ЗНАНИЙ О КУБАХ-КОНЦЕПТАХ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ АДАПТИВНОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТАМИ АНАЛИЗА OLAP*

А. В. Коробко, Т. Г. Пенькова

Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44. E-mail: lynx@icm.krasn.ru

Необходимость оперативной аналитической обработки больших объемов данных в задачах организационного управления требует создания новых подходов к реализации технологии OLAP. Качество анализа данных на основе OLAP во многом определяется доступностью исходных данных и прозрачностью аналитической модели предметной области. Актуальной является задача разработки методов и алгоритмов построения интегральной аналитической модели предметной области на основе структуры исходных данных и знаний эксперта. В основе работы лежит интеграция технологии оперативного анализа данных и анализа формальных понятий. Предложены продукционная модель знаний о кубах-концептах и алгоритм определения оптимального куба-концепта для поддержки адаптивного манипулирования объектами анализа предметной области. Рассмотрен пример логического вывода для концептуальной OLAP-модели научной деятельности организации.

Ключевые слова: концептуальное OLAP-моделирование, оперативная аналитическая обработка данных, инженерия знаний, формирование аналитических запросов.

REPRESENTATION AND IMPLEMENTATION OF KNOWLEDGE ABOUT CUBE-CONCEPTS FOR ANALYTICAL MANIPULATION SUPPORT

A. V. Korobko, T. G. Penkova

Institute of Computational Modeling of the SB RAS
50, building 44 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: lynx@icm.krasn.ru

The necessity of the analytical processing of large data volume for organizational management requires the development of new approaches to OLAP technology. The quality of the data analytical processing is determined by accessibility of the primary data and by transparency of the domain analytical model. The issue of developing methods and algorithms for comprehensive (integral) analytical model constructing based on data source structure and expert knowledge. In this paper an original production rule model of knowledge about cube-concepts is proposed. An algorithm of optimal cube-concept determination for analytical manipulation support is suggested. An example of forward chain execution for science activity OLAP-model is described.

Keywords: conceptual analytical modeling, on-line analytical processing, knowledge computing, analytical demand assignment.

Повышение эффективности аналитической обработки больших объемов данных для принятия обоснованных решений требует развития средств адаптивного манипулирования объектами анализа в технологии OLAP (On-line analytical processing) [1–5]. Формирование каталога показателей дает возможность систематизировать объекты анализа, но не позволяет выполнять их совместную аналитическую обработку [2; 6]. Построение онтологии предметной области дает возможность оперировать всеми объектами, включенными в онтологию, но не позволяет оперативно формировать запросы в ходе аналитического эксперимента [7; 8].

В авторских работах [9; 10], построения интегральной аналитической модели предметной области

предложен метод концептуального OLAP-моделирования, позволяющий строить интегральную OLAP-модель предметной области в виде решетки многомерных кубов на основе экспертных знаний об объектах анализа и возможности их совместной аналитической обработки [11; 12].

Для реализации оригинального метода разработаны алгоритмы поиска кубов-концептов на основе контекста предметной области и построения концептуальной решетки OLAP-кубов [5; 6]. С целью поддержки адаптивного манипулирования объектами анализа интегральной OLAP-модели актуальной становится задача определения оптимального куба-концепта на множестве всех объектов анализа предметной области.

*Работа выполнена при поддержке гранта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2010–2013 годы (ГК № 02.740.11.0621) и гранта РФФИ № 12-07-31143.

В работе предлагаются продукционная модель представления знаний о кубах-концептах, упорядоченных отношением Галуа в виде концептуальной решетки кубов, и алгоритм определения оптимального куба-концепта для частной аналитической задачи на множестве всех доступных объектов анализа. Разработанные средства представления и применения знаний о кубах-концептах позволяют осуществлять адаптивное манипулирование объектами анализа OLAP, что значительно повышает эффективность аналитической обработки многомерных данных и способствует обнаружению новых знаний для принятия решений.

Интегральная аналитическая модель предметной области в виде концептуальной решетки OLAP-кубов. Интегральная аналитическая модель предметной области строится путем применения анализа формальных понятий к аналитическим объектам в терминах технологии OLAP. Основу интегральной OLAP-модели составляет множество объектов анализа, которые используются для построения OLAP-кубов: множество показателей $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ и множество измерений $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$. Между элементами множеств F и D определяется отношение сопоставимости R – возможность совместной аналитической обработки показателей и измерений. $R \subseteq F \times D$, $(f_i, d_j) \in R$, если показатель f_i может быть проанализирован по измерению d_j . Тройка (F, D, R) , в соответствии с теорией анализа формальных понятий [13; 14], представляет собой формальный контекст K . Формальный контекст отражает знания эксперта об объектах анализа предметной области и о возможности их совместной аналитической обработки.

На основе формального контекста K определяется множество концептов – OLAP-кубов (кубов-концептов) по признаку сопоставимости объектов анализа. Для произвольных $X \subseteq F$ и $Y \subseteq D$ определяется операция «штрих» следующим образом:

$$X' = \{d \in D \mid \forall f \in X, (fRd)\}; \\ Y' = \{f \in F \mid \forall d \in Y (fRd)\}.$$

Пара (A, B) , где $A \subseteq F$, $B \subseteq D$ такие, что $A = B'$ и $B = A'$, называется кубом-концептом контекста K . Множество A состоит из показателей одинаковой размерности, которые могут быть проанализированы по всем измерениям из B . (A, B) – многомерный куб, полный относительно добавления показателей той же размерности и состава измерений. Множество показателей A представляет *объем* куба-концепта, а множество измерений B – *содержание* куба-концепта.

Множество всех кубов-концептов частично упорядочено отношением Галуа: $(A_1, B_1) \leq (A_2, B_2)$, если $A_1 \subseteq A_2$ и $B_1 \subseteq B_2$ [15]. В этом случае, (A_1, B_1) – *подкуб* (A_2, B_2) , а (A_2, B_2) – *надкуб* (A_1, B_1) . Множество показателей надкуба включает множество показателей подкуба, а в свою очередь, множество измерений подкуба включает множество измерений надкуба. Упорядоченное отношением подкуб-надкуб множество всех кубов-концептов образует концептуальную решетку

OLAP-кубов и представляет собой интегральную аналитическую модель.

Модель представления знаний о концептах – OLAP-кубах

Для поддержки адаптивного манипулирования объектами анализа интегральной OLAP-модели разработана продукционная модель представления знаний о кубах-концептах. Модель основана на свойствах концептуальной решетки, согласно которым: надкуб любого куба-концепта решетки содержит наибольший объем (множество показателей) и наименьшее содержание (множество измерений), а подкуб, наоборот – содержит наибольшее содержание и наименьший объем. То есть, при переходе по ребру решетки от подкуба к надкубу происходит расширение объема и сокращение содержания и аналогично, при переходе по ребру решетки от надкуба к подкубу происходит сокращение объема и расширение содержания. Таким образом, модель знаний, представляющая концептуальную решетку кубов, отражает отношения между кубами-концептами решетки и между объемом и содержанием кубов-концептов. Разработанная модель содержит правила вида:

$$S:F:N: \text{IF } \langle (A_{\text{cur}} = A_{\text{super}}) \& (P \cap X = \emptyset) \rangle \\ > \text{ THEN } \langle A_{\text{cur}} \rightarrow A_{\text{sub}} \rangle; \quad (1)$$

$$S:D:N: \text{IF } \langle (B_{\text{cur}} = B_{\text{sub}}) \& (Q \cap Y = \emptyset) \rangle \\ > \text{ THEN } \langle B_{\text{cur}} \rightarrow B_{\text{super}} \rangle; \quad (2)$$

$$S:F:N: \text{IF } \langle A_{\text{cur}} = A \rangle \text{ THEN } \langle B_{\text{cur}} \rightarrow B \rangle; \quad (3)$$

$$S:D:N: \text{IF } \langle B_{\text{cur}} = B \rangle \text{ THEN } \langle A_{\text{cur}} \rightarrow A \rangle. \quad (4)$$

Здесь S – уникальное в базе знаний имя правила; F, D – указатель назначения, характеризующий зону действия правила для показателей и измерений соответственно; N – приоритет применения правила, указывающий на преимущественное применение правила при разрешении конфликтов; A_{cur} – начальное множество показателей для процедуры логического вывода; A_{sub} – объем (множество показателей) подкуба; A_{super} – объем (множество показателей) надкуба; P – множество показателей, удаляемых из объема надкуба при переходе к подкубу; X – множество показателей, требуемых для аналитической обработки; B_{cur} – начальное множество измерений для процедуры логического вывода; B_{super} – содержание (множество измерений) надкуба; B_{sub} – содержание (множество измерений) подкуба; Q – множество измерений, удаляемых из подкуба при переходе к надкубу; Y – множество измерений, требуемых для аналитической обработки. Символ $\rightarrow$ обозначает переход от одного куба-концепта к другому.

Правила (1) и (2) описывают переход по ребру концептуальной решетки. Правила типа (3) и (4) описывают отношение между множеством показателей и множеством измерений куба-концепта решетки. Правила типа (1) и (2) имеют более высокий приоритет по сравнению с правилами типа (3) и (4). Другими словами, приоритетным является переход от одного куба-концепта решетки к другому. В случае, если ни одно правило перехода не может быть выполнено, осуще-

ствляется подстановка множеств показателей или измерений соответственно.

Принципы поддержки адаптивного манипулирования объектами анализа на основе продукционной модели представления знаний. Интегральная аналитическая модель, построенная в виде концептуальной решетки OLAP-кубов, позволяет пользователю проводить аналитические эксперименты на множестве всех доступных объектов анализа предметной области [12]. Свойства концептуальной решетки позволяют определять дополнительные показатели и измерения, которые могут быть проанализированы вместе с выбранными пользователем объектами анализа. Поэтому поддержка адаптивного манипулирования объектами анализа заключается в формировании дополнительных показателей и измерений для оперативной аналитической обработки.

Согласно свойствам концептуальной решетки, множество всех кубов-концептов, удовлетворяющих текущему запросу пользователя, представляет собой подрешетку интегральной модели. Куб-концепт подрешетки, расположенный на самом верхнем уровне содержит максимальный набор дополнительных показателей – максимальный куб-концепт для текущего запроса. В свою очередь, куб-концепт подрешетки, расположенный на самом нижнем уровне содержит максимальный набор дополнительных измерений – минимальный куб-концепт для текущего запроса. Таким образом, определение максимального и минимального кубов-концептов для текущего пользовательского запроса и формирование максимальных наборов дополнительных объектов анализа – основная задача логического вывода.

Процедура определения дополнительных объектов анализа для текущего запроса соответствует прямой цепочке логического вывода и заключается в последовательном сравнении условий правила (антецедента) и выполнении соответствующих действий (консеквента) [16].

Основными параметрами процедуры определения дополнительных объектов анализа являются текущий запрос пользователя, максимальный куб-концепт и минимальный куб-концепт. В начальный момент работы текущий запрос пользователя представляет собой пару $(\emptyset, \emptyset)$, максимальный куб-концепт – это куб-концепт, расположенный на самом верхнем уровне решетки кубов, минимальный куб-концепт – это куб-концепт, расположенный на самом нижнем уровне решетки кубов. При добавлении показателя в текущий запрос, начальное состояние определяется как множество показателей максимального куба-концепта подрешетки, соответствующей запросу на предыдущем шаге. В качестве входных параметров передаются множество требуемых показателей X и начальное множество показателей A_{cur} . Результат вывода – множество измерений B_{cur} , определяющее содержание минимального куба-концепта подрешетки, соответствующей запросу на текущем шаге. При добавлении измерения в текущий запрос начальное состояние определяется как множество измерений минимального куба-концепта подрешетки, соответствующей за-

просу на предыдущем шаге. В качестве входных параметров передаются множество требуемых измерений Y и начальное множество измерений B_{cur} . Результат вывода – множество показателей A_{cur} , определяющее объем максимального куба-концепта подрешетки, соответствующей запросу на текущем шаге.

Алгоритм определения оптимального куба-концепта для частной аналитической задачи. Исходя из свойств концептуальной решетки и принципов поддержки адаптивного манипулирования объектами анализа, разработан алгоритм определения оптимального куба-концепта для частной аналитической задачи на множестве всех доступных объектов анализа предметной области. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

Алгоритм заключается в последовательном добавлении объектов анализа в пользовательский запрос и определения объема и содержания оптимального куба-концепта на основе применения правил вывода.

Работа алгоритма начинается с определения начального состояния переменных, участвующих в процессе поиска оптимального куба-концепта. Объем и содержание пользовательского запроса определяются как пустые множества. Содержание оптимального куба-концепта X_{opt} равно множеству показателей интегральной модели, объем оптимального куба-концепта Y_{opt} равен множеству измерений интегральной модели. A_{sup} и B_{sup} определяются как содержание и объем максимального куба-концепта решетки, который соответствует точной верхней границе множества кубов-концептов $V(K) - \sup(V(K))$. A_{inf} и B_{inf} определяются как содержание и объем минимального куба-концепта решетки, который соответствует точной нижней границе множества кубов-концептов $V(K) - \inf(V(K))$.

Затем алгоритм ожидает выбора объекта анализа пользователем. Если объект анализа не был выбран, то алгоритм прекращает свою работу. После выбора объекта анализа определяется его тип, путем проверки вхождения k в множество X_{opt} . Если выбранный объект принадлежит содержанию оптимального куба-концепта, то k добавляется к содержанию пользовательского запроса X , тип объекта анализа t для выбора правил определяется как $'F'$ и значение A_{inf} устанавливается равным A_{sup} . Если выбранный объект принадлежит объему оптимального куба-концепта, то k добавляется к объему пользовательского запроса Y , тип объекта анализа t для выбора правил определяется как $'D'$ и значение B_{sup} устанавливается равным B_{inf} . Если выбранный пользователем объект анализа не принадлежит оптимальному кубу-концепту, то алгоритм возвращается на этап выбора нового объекта анализа.

Для выбора правил в соответствии с их приоритетом, определяется параметр n , принимающий значения 1 и 2. Затем в цикле по s , где s изменяется от 1 до мощности множества правил $|L|$, описывающих интегральную модель, происходит сначала выбор правила в соответствии с установленными значениями t и n , а затем проверка условий применимости правила и его выполнение.

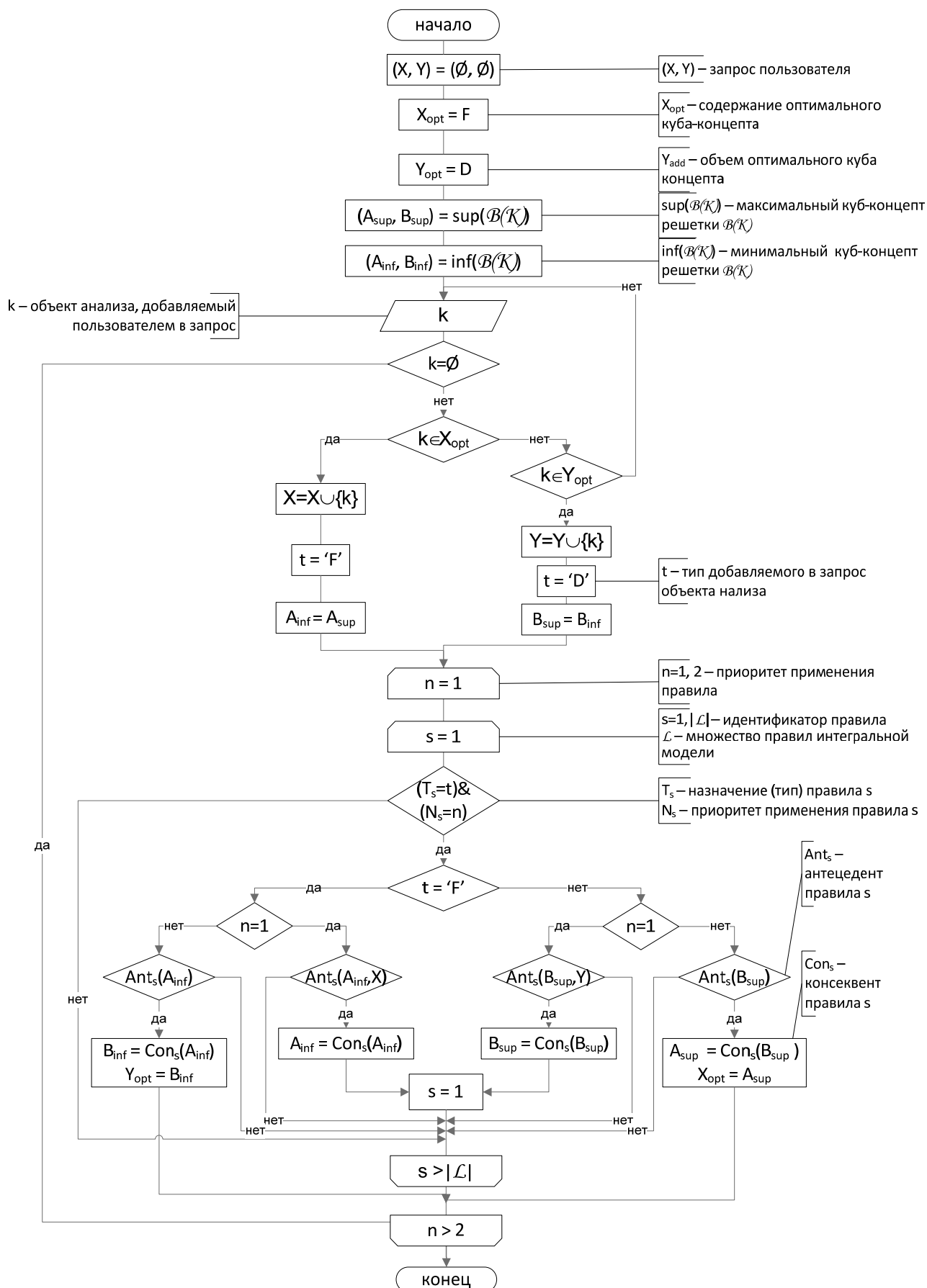


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения оптимального куба-концепта

		d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10
		Год	Автор	Тип публикации	Город	Журнал	База цитирования	Грант	Тип пособия	Тип объекта интел. соб-ти	Статус конференции
f1	Число публикаций	x	x	x	x	x	x	x			
f2	Число материалов конф-ий	x	x	x	x	x	x	x			x
f3	Число учебных пособий	x	x	x	x			x	x		
f4	Число объектов интел. соб-ти	x	x							x	
f5	Число конференций	x			x		x	x			x

Рис. 2. Фрагмент формального контекста научной деятельности организации

При $t = 'D'$ и $n = 1$ для проверки антецедента правила используется множество B_{sup} и объем пользовательского запроса Y . В случае выполнения условий антецедента значение B_{sup} меняется в соответствии с консеквентом правила и проверка правил начинается с начала цикла.

При $t = 'D'$ и $n = 2$ для проверки антецедента правила используется только множество B_{sup} . В случае выполнения условий антецедента значение A_{sup} меняется в соответствии с консеквентом правила, содержание оптимального куба X_{opt} становится равным A_{sup} , заканчивается проверка правил и алгоритм переходит на этап выбора нового объекта анализа.

Таким образом, алгоритм обеспечивает поддержку построения пользовательского запроса для частной аналитической задачи в соответствии с интегральной OLAP-моделью и формирует оптимальный куб-концепт $(X_{\text{opt}}, Y_{\text{opt}})$ на каждом шаге построения пользовательского запроса. Объем найденного оптимального куба-концепта соответствует нижнему кубу-концепту подрешетки кубов, удовлетворяющих пользовательскому запросу, и содержит максимальное количество измерений для совместной аналитической обработки с текущим запросом пользователя. Содержание найденного оптимального куба-концепта соответствует верхнему кубу-концепту подрешетки кубов, удовлетворяющих пользовательскому запросу, и содержит максимальное количество показателей для совместной аналитической обработки с текущим запросом пользователя.

Адаптивное манипулирование объектами анализа на основе интегральной OLAP-модели научной деятельности организации. Рассмотрим реализацию принципов адаптивного манипулирования объектами анализа и работу алгоритма поиска оптимального куба-концепта для интегральной OLAP-модели научной деятельности организации.

На рис. 2 представлен фрагмент формального контекста научной деятельности организации, строки которого соответствуют показателям, а столбцы – измерениям. Используя сокращенные обозначения,

получим соответственно: $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$ и $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9, d_{10}\}$. Отношение R записывается следующим образом: $R = \{(f_1, d_1), (f_1, d_2), (f_1, d_3), (f_1, d_4), \dots, (f_5, d_{10})\}$.

На рис. 3 приведена концептуальная решетка OLAP-кубов, построенная в рамках рассматриваемого формального контекста и представляющая интегральную аналитическую модель научной деятельности. На рис. 4 проиллюстрировано соответствие подрешетки запросу пользователя на каждом шаге логического вывода.

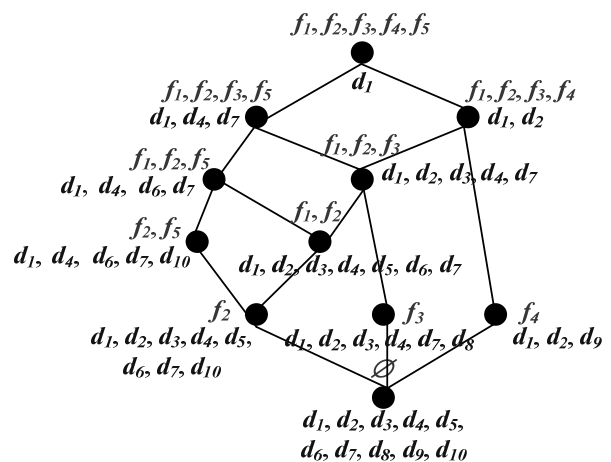


Рис. 3. Концептуальная решетка OLAP-кубов научной деятельности организации

Разработанные средства представления и применения знаний о кубах-концептах позволяют осуществлять адаптивное манипулирование объектами анализа предметной области.

Возможность выявления аналитических зависимостей между объектами анализа позволяет значительно повысить эффективность аналитической обработки данных и способствует обнаружению новых знаний для принятия управленческих решений.

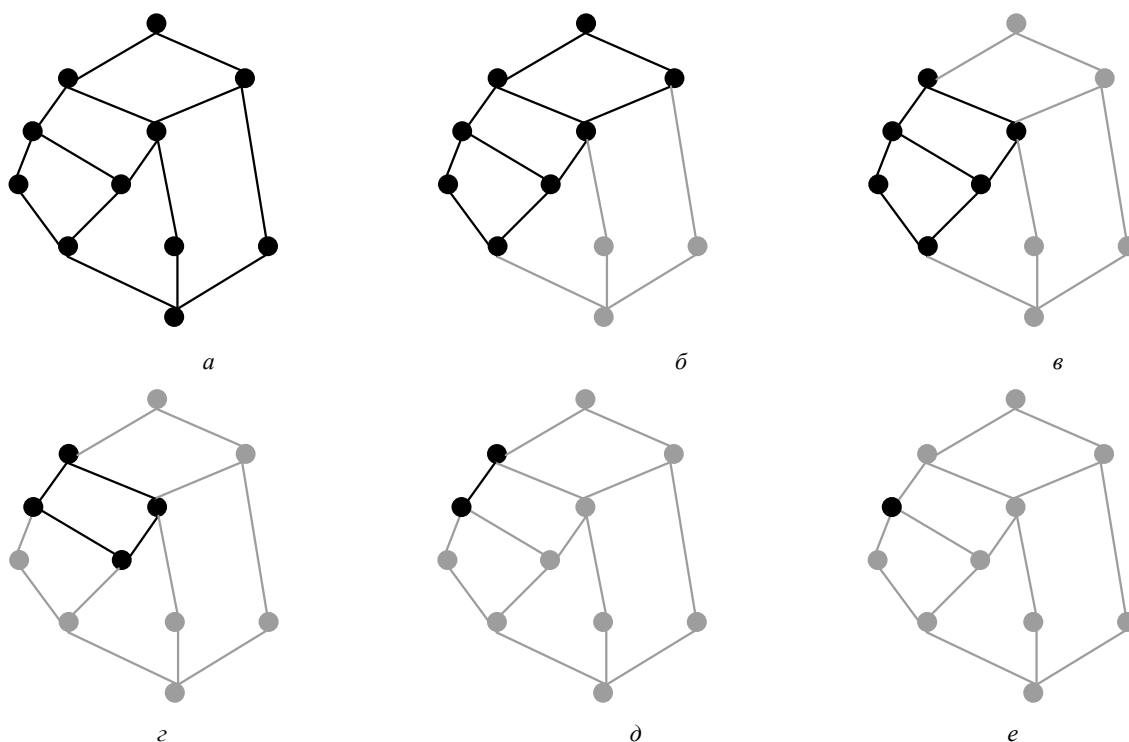


Рис. 4. Соответствие подрешетки концептуальной OLAP-модели запросам пользователя:
 а) – ($\emptyset$, $\emptyset$); б) – ($\{f_2\}$, $\emptyset$); в) – ($\{f_2, d_7\}$); д) – ($\{f_1, f_2\}$, d_7); е) – ($\{f_1, f_2, f_5\}$, d_7); ф) – ($\{f_1, f_2, f_5\}$, $\{d_6, d_7\}$)

Библиографические ссылки

1. Codd E. F., Codd S. B., Salley C. T. Providing OLAP // On-line Analytical Processing to User-Analysts: An IT Mandate. CT Salley, EF Codd & Associates. 1993. Vol. 19.
2. Honorvar L., Campbell S., Showalter T. Use of online analytical processing (OLAP) in a rules based decision management system. United States Patent: US 2004/6430545 B1.
3. Ноженкова Л. Ф., Шайдулов В. В. OLAP-технологии оперативной информационно-аналитической поддержки организационного управления // Информационные технологии и вычислительные системы. № 2. 2010. С. 15–27.
4. Qwaider W. Q. Apply On-Line Analytical Processing (OLAP) With Data Mining For Clinical Decision Support // International Journal of Managing Information Technology (IJMIT) Vol. 4, No. 1, 2012 P. 25–37.
5. Tsois A., Karayannidis N., Sellis T. MAC: Conceptual data modeling for OLAP // Proc. of the International Workshop on DMDW. 2001. С. 28–55.
6. Шовкун А. В. Технология построения репозитория метаданных для хранилища данных // Научная сессия МИФИ-2003. Сборник научных трудов. Т 2. М. : МИФИ, 2003. С. 76–77
7. Lee J., Mazzoleni P., Sairamesh J., Touma M. System and method for planning and generating queries for multi-dimensional analysis using domain models and data federation, 2008. United States Patent: US 2008/7337170 B2.
8. Priebe T., Pernul G. Ontology-based integration of OLAP and information retrieval // Database and Expert Systems Applications, 2003. Proceedings. 14th International Workshop on. IEEE, 2003. С. 610–614.
9. Коробко А. В., Пенькова Т. Г. Метод концептуального OLAP-моделирования на основе формального концептуального анализа // Вестник СибГАУ. Красноярск. 2010. Вып. 4(30). С. 74–79.
10. Пенькова Т. Г., Коробко А. В. Построение интегральной OLAP-модели на основе формального концептуального анализа // Информатизация и связь. 2011. № 3. С. 23–25.
11. Коробко А. В., Пенькова Т. Г. Алгоритмы формирования интегральной OLAP-модели предметной области // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 5(38). С. 49–55.
12. Penkova T. Korobko A. Method of constructing the integral OLAP-model based on formal concept analysis // Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. IOS Press, ISSN 0922-6389. 2012. Vol. 243. P. 219–227, doi:10.3233/978-1-61499-105-2-21.
13. Wille R. Restructuring Lattice Theory: an approach based on hierarchies of concept. Reidel, Dordrecht-Boston, 1982. P. 445–470.
14. Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis: mathematical Foundations. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York, 1999.
15. Биркгоф Г. Теория решеток. М. : Наука, 1984. 568 с.
16. Уэно Х., Исидзука М. Представление и использование знаний. М. : Мир, 1989.

References

1. Codd E. F., Codd S. B., Salley C. T. Providing OLAP. On-line Analytical Processing to User-Analysts: An IT Mandate. CT Salley, EF Codd & Associates. 1993, Vol. 19.
2. Honorvar L., Campbell S., Showalter T. Use of online analytical processing (OLAP) in a rules based decision management system. United States Patent: US 2004/6430545 B1.
3. Nozhenkova L. F., Shaidurov V. V. *Informatsionnye tehnologii i vychislitelnye sistemy*. 2010, № 2, p. 15–27.
4. Qwaider W. Q. Apply On-Line Analytical Processing (OLAP) With Data Mining For Clinical Decision Support. International Journal of Managing Information Technology (IJMIT), vol. 4, no. 1, 2012, p. 25–37.
5. Tsois A., Karayannidis N., Sellis T. MAC: Conceptual data modeling for OLAP. Proc. of the International Workshop on DMDW, 2001, p. 28–55.
6. Shovkun A. V. *Nauchnaya sessiya MIFI-2003. Sbornik nauchnykh trudov*. vol. 2. Moscow, MIFI, 2003, p. 76–77.
7. Lee J., Mazzoleni P., Sairamesh J., Touma M. System and method for planning and generating queries for multi-dimensional analysis using domain models and data federation, 2008. United States Patent: US 2008/7337170 B2.
8. Priebe T., Pernul G. Ontology-based integration of OLAP and information retrieval. Database and Expert Systems Applications, 2003. Proceedings. 14th International Workshop on. IEEE, 2003, p. 610–614.
9. Korobko A. V., Penkova T. G. *Vestnik SibGAU*. 2010, № 4(30), p. 74–79.
10. Korobko A. V., Penkova T. G. *Informatizatsiya I svyaz*. 2011, № 3, p. 23–25.
11. Korobko A. V., Penkova T. G. *Vestnik SibGAU*. 2011, № 5(38), p. 49–55.
12. Penkova T. Korobko A. Method of constructing the integral OLAP-model based on formal concept analysis. Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. IOS Press. 2012. vol. 243, p. 219–227, doi: 10.3233/978-1-61499-105-2-21
13. Wille R. Restructuring Lattice Theory: an approach based on hierarchies of concept. Reidel, Dordrecht-Boston, 1982, p. 445–470.
14. Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis: mathematical Foundations. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg New York, 1999.
15. Birkhoff G. *Teoriya reshotok* (Lattice Theory). Moscow, Nauka, 1984, 568 p.
16. Ueno H., Ishizuka M. *Predstavlenie i ispolzovanie znaniy* (The presentation and use of knowledge). Moscow. Mir. 1989.

© Коробко А. В., Пенькова Т. Г., 2013

УДК 519.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИЙ РОСТА В КОНЕЧНЫХ ДВУПОРОЖДЕННЫХ ГРУППАХ ПЕРИОДА 5

А. С. Кузнецова

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

Пусть $B_0(2,5,k)$ – максимальная конечная двупорожденная бернсайдова группа периода 5 степени нильпотентности k и $\{a_1, a_2\}$ – порождающие элементы данной группы. Ранее автором совместно с А. А. Кузнецовым были получены функции роста $B_0(2,5,k)$ относительно порождающего множества $\{a_1, a_1^{-1}a_2, a_2^{-1}\}$ при $k \leq 5$. В настоящей работе создан компьютерный алгоритм, вычисляющий функцию роста и диаметр графа Кэли конечной p -группы, заданной порождающим множеством $A = \{a_1, a_2\}$. На основе алгоритма получены функции роста групп $B_0(2,5,k)$ относительно A для $k \leq 5$. Рассматриваемая задача помимо фундаментального значения, имеет также и приложения, например, при проектировании компьютерных вычислительных сетей. Сеть процессоров может быть представлена как неориентированный граф, в котором процессоры являются вершинами, а две вершины графа соединены ребром, если имеется прямое соединение между соответствующими процессорами. С одной стороны, желательно, чтобы между процессорами было как можно меньше соединений, а с другой, обмен данными между процессорами предпочтительно производить с наи-

меньшим числом посредников. Очевидно, эти два критерия противоречат друг другу. На теоретико-групповом языке диаметр графа вычислительной сети будет равен максимальной длине минимальных слов соответствующей графу группы.

Ключевые слова: функция роста, диаметр Кэли.

STUDY OF THE GROWTH FUNCTIONS IN TWO-GENERATOR GROUPS OF THE EXPONENT 5

A. S. Kuznetsova

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

Let $B_0(2,5,k)$ be the largest finite two generated Burnside group of the exponent 5 of the nilpotency class k and $\{a_1, a_2\}$ be generators of this group. Earlier the author together with A.A. Kuznetsov obtained the growth functions of $B_0(2,5,k)$ with respect to the generating set $\{a_1, a_1^{-1}a_2, a_2^{-1}\}$ for $k \leq 5$. In this work a computer algorithm that calculates the growth function and the Cayley diameter of the graph of a finite p -group, defined by the generating set $A = \{a_1, a_2\}$, is created. On the basis of the algorithm the growth functions of $B_0(2,5,k)$ with respect to the generating set A for $k \leq 5$ is obtained. The considered task, besides for substantial significance, has applications as well. For example, a network of processors for parallel computation can be regarded as an undirected graph in which the vertices are the processors, and two vertices are joined with the edge if there is a direct connection between the two processors represented. The design of a large network is more feasible if the number of connections is small, but computations become more efficient if the short paths connect any two vertices (that is, the diameter of the graph should be as small as possible). Of course, these two requirements tend to conflict with each other. At the group-theoretic language the diameter of the graph of a computing network is equal to the maximum length of minimal words of the group graph.

Keywords: growth function, Cayley diameter.

Пусть $B_0(2,5,k)$ – максимальная конечная двупорожденная бернсайдова группа периода 5 степени nilпотентности k . В данном классе групп наибольшей является группа $B_0(2,5,12)$, порядок которой равен 5^{34} [1]. Положим $\{a_1, a_2\}$ – порождающие элементы $B_0(2,5,k)$.

В [2] было начато исследование функций роста в группах $B_0(2,5,k)$. Относительно порождающего множества $\{a_1, a_1^{-1}a_2, a_2^{-1}\}$ вычислены указанные характеристики групп для $k \leq 5$.

Настоящая работа является логичным продолжением [2]. В ней будут представлены результаты вычислений функций роста указанных групп для порождающего множества $A = \{a_1, a_2\}$ при $k \leq 5$. Функция роста группы $B_0(2,5,6)$ относительно A получена К. А. Филипповым в работе [3].

Для вычисления функции роста и диаметра графа Кэли относительно A необходимо перечислить все элементы группы в формате минимальных слов [4]. Вычислив количество слов на каждой длине, можно будет получить функцию роста группы, а максимально возможная длина минимальных слов будет являться диаметром Кэли группы.

Отметим, что для случаев $k = 2, 3, 4, 5$ были использованы компьютерные вычисления, основанные на алгоритме из разд. 1.

Рассматриваемая задача помимо фундаментального значения, имеет также и приложения, например, при проектировании компьютерных вычислительных сетей [5]. Сеть процессоров может быть представлена как неориентированный граф, в котором процессоры являются вершинами, а две вершины графа соединены ребром, если имеется прямое соединение между соответствующими процессорами. С одной стороны, желательно, чтобы между процессорами было как можно меньше соединений, а с другой, обмен данными между процессорами предпочтительно производить с наименьшим числом посредников. Очевидно, эти два критерия противоречат друг другу. На теоретико-групповом языке диаметр графа вычислительной сети будет равен максимальной длине минимальных слов соответствующей графу группы.

Описание алгоритма вычисления функции роста группы. Пусть p – простое число, а G – конечная группа экспоненты p . Это значит, что $g^p = 1$ для всех $g \in G$. Положим $A = \{a_1, a_2\}$ – порождающие элементы G . На множестве A введем отношение порядка « $\prec$ » (меньше): $a_1 \prec a_2$. Пусть g элемент из G . Тогда его можно представить в виде конечного произведения из порождающих, т. е. $g = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \alpha_s$, где $\alpha_i \in A$, правую часть данного равенства мы будем называть словом и записывать $v = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_s$. Натуральное число s будем называть длиной слова v .

Функция $L(v)$ определена на множестве всех слов и равна длине слова v , т. е. $L(v) = s$ для слова v , указанного выше. Единица группы e будет представлена пустым словом, которое мы будем обозначать ε . По определению, длина пустого слова равна 0.

Определение отношения порядка на множестве слов. Будем говорить, что слово v меньше слова w и записывать это как $v < w$, если имеет место одно из следующих утверждений:

1. $L(v) < L(w)$;
2. Если $L(w) = L(v)$, тогда пусть $v = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_s$ и $w = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_s$, $\alpha_1 = \beta_1$, $\alpha_2 = \beta_2$, $\alpha_{k-1} = \beta_{k-1}$, $\alpha_k < \beta_k$ для некоторого $1 \leq k \leq s$.

Определение минимального слова. Слово v будем называть минимальным в G относительно введенного порядка, если для любого другого слова w , удовлетворяющего условию $g_v = g_w$, будет выполняться $v < w$.

Так как G нильпотентна, то мы можем найти цепочку подгрупп G_i ($1 \leq i \leq n$), обладающих следующими свойствами:

$$G = G_1 \supset G_2 \supset \dots \supset G_n \supset G_{n+1} = e,$$

G_i нормальны в G , а факторы G_i / G_{i+1} имеют порядок p и лежат в центре G / G_{i+1} .

Пусть для $1 \leq i \leq n$ элемент $a_i \in G_i$, но $a_i \notin G_{i+1}$, тогда каждый элемент группы $g \in G$ может однозначно записан в виде

$$g = a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} \dots a_n^{\gamma_n}, 0 \leq \gamma_i \leq p. \quad (1.1)$$

Такое представление элементов группы (репрезентацию), можно получить при помощи алгоритма известного как p -quotient algorithm [6]. Он реализован в системах компьютерной алгебры GAP и Magma. Если A – порождающее множество группы G , то любой ее элемент, записанный в виде слова $a_1 a_2 \dots a_s$, где $a_i \in A$, можно преобразовать к виду (1):

$$a_1 a_2 \dots a_s \xrightarrow{pq} a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} \dots a_n^{\gamma_n}. \quad (2)$$

Процедура (2) дает возможность решить проблему равенства слов в G . На ее основе мы можем перечислить элементы G в формате минимальных слов.

Обозначим через $K_s(G)$ множество всех минимальных слов группы G , не превосходящих по длине s . Множество $Q_s(G)$ – элементы $K_s(G)$, записанные в виде правой части (2). Пустое слово – единицу группы обозначим e .

Пусть $s_0 \in N$ – минимальное число, для которого выполняется $K_{s_0}(G) = K_{s_0+1}(G)$. В этом случае s_0 будет являться диаметром Кэли группы G . Опишем алгоритм, вычисляющий K_s :

1. $s = 0$, $K_0 = \{e\}$, $Q_0 = \{e\}$, $T = K_0$.
2. $s = s + 1$, $K_s = K_{s-1}$, $Q_s = Q_{s-1}$, $V = a_1 T \cup a_2 T$, $T = \emptyset$, $i = 1$.

3. Для $v_i \in V \xrightarrow{pq} w$. Если $w \notin Q_s$, то $K_s = K_s \cup v_i$, $Q_s = Q_s \cup w$, $T = T \cup v_i$.

4. Если $\begin{cases} i < |V|, \text{ то } i = i + 1, \text{ переход в 3;} \\ i = |V|, \text{ то переход в 5.} \end{cases}$

5. Если $\begin{cases} T \neq \emptyset, \text{ то переход в пункт 2;} \\ T = \emptyset, \text{ то переход в пункт 6.} \end{cases}$

6. Диаметр G равен $s - 1$, $K_{s-1}(G)$ – множество всех минимальных слов группы. Функция роста задается формулой $f(j) = |K_j(G)| - |K_{j-1}(G)|$ ($1 \leq j \leq s - 1$).

7. Завершение работы алгоритма.

Группа $B_0(2, 5, 1)$. Данная группа представляет собой элементарную абелеву группу, порядок которой равен 5^2 . Нетрудно вычислить функцию роста данной группы и диаметр Кэли (см. табл. 1). Справедлива следующая

Теорема 1. Относительно порождающего множества A группа $B_0(2, 5, 1)$ имеет диаметр Кэли, равный 8, а функция роста задана табл. 1.

Доказательство. Очевидно.

Таблица 1

Функция роста группы $B_0(2, 5, 1)$

Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов
0	1	3	4	6	3
1	2	4	5	7	2
2	3	5	4	8	1
$ B_0(2, 5, 1) = 5^2 = 25$					

Группа $B_0(2, 5, 2)$. Любой элемент группы $B_0(2, 5, 2)$ представим в виде нормального коммутаторного слова [1]:

$$g = a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} a_3^{\gamma_3}, \gamma_i \in Z_5.$$

Для умножения элементов, будем использовать полиномы Холла, полученные в [7].

Пусть $a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3}$ и $a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3}$ – два произвольных элемента в группе $B_0(2, 5, 2)$, записанных в коммутаторном виде. Тогда их произведение равно $a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} \cdot a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3} = a_1^{z_1} a_2^{z_2} a_3^{z_3}$, где $z_i \in Z_5$ и:

$$z_1 = x_1 + y_1,$$

$$z_2 = x_2 + y_2,$$

$$z_3 = x_3 + y_3 + x_2 y_1.$$

Применив алгоритм из разд. 1, получим функцию роста рассматриваемой группы (табл. 2).

Имеет место

Теорема 2. Относительно порождающего множества A группа $B_0(2, 5, 2)$ имеет диаметр Кэли, равный 10, а функция роста задана табл. 2.

Доказательство. Следует из вычислений функции роста группы $B_0(2, 5, 2)$ по алгоритму из разд. 1.

Таблица 2

Функция роста группы $B_0(2,5,2)$

Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов
0	1	3	8	6	23	9	10
1	2	4	15	7	21	10	4
2	4	5	20	8	17		
$ B_0(2,5,2) = 5^3 = 125$							

Таблица 3

Функция роста группы $B_0(2,5,3)$

Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов
0	1	6	56	12	487	18	12
1	2	7	100	13	438	19	4
2	4	8	166	14	343	20	2
3	8	9	262	15	222		
4	16	10	370	16	112		
5	30	11	455	17	34		
$ B_0(2,5,3) = 5^5 = 3125$							

Группа $B_0(2,5,3)$. Каждый элемент группы $B_0(2,5,3)$ представим в виде нормального коммутаторного слова

$$g = a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} a_3^{\gamma_3} a_4^{\gamma_4} a_5^{\gamma_5}, \gamma_i \in Z_5.$$

Пусть $a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} a_4^{x_4} a_5^{x_5}$ и $a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3} a_4^{y_4} a_5^{y_5}$ – два произвольных элемента в группе $B_0(2,5,3)$, записанных в коммутаторном виде. Тогда их произведение равно $a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} a_4^{x_4} a_5^{x_5} \cdot a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3} a_4^{y_4} a_5^{y_5} = a_1^{z_1} a_2^{z_2} a_3^{z_3} a_4^{z_4} a_5^{z_5}$, где $z_i \in Z_5$ и:

$$z_1 = x_1 + y_1,$$

$$z_2 = x_2 + y_2,$$

$$z_3 = x_3 + y_3 + x_2 y_1,$$

$$z_4 = x_4 + y_4 + x_2 \binom{y_1}{2} + x_3 y_1,$$

$$z_5 = x_5 + y_5 + x_2 y_1 y_2 + \binom{x_2}{2} y_1 + x_3 y_2.$$

Здесь и далее $\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$ – биномиальный ко-

эффициент. Применяв алгоритм из разд. 1, вычислим функцию роста группы $B_0(2,5,3)$ (табл. 3).

Справедлива следующая

Теорема 3. *Относительно порождающего множества A группа $B_0(2,5,3)$ имеет диаметр Кэли, равный 20, а функция роста задана таблицей 3.*

Доказательство. Следует из вычислений функции роста группы $B_0(2,5,3)$ по алгоритму из разд. 1.

Группа $B_0(2,5,4)$. Каждый элемент группы $B_0(2,5,4)$ представим в виде нормального коммутаторного слова

$$g = a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} a_3^{\gamma_3} a_4^{\gamma_4} a_5^{\gamma_5} a_6^{\gamma_6} a_7^{\gamma_7} a_8^{\gamma_8}, \gamma_i \in Z_5.$$

Пусть $a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} a_4^{x_4} a_5^{x_5} a_6^{x_6} a_7^{x_7} a_8^{x_8}$ и $a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3} a_4^{y_4} a_5^{y_5} a_6^{y_6} a_7^{y_7} a_8^{y_8}$ – два произвольных элемента в группе $B_0(2,5,4)$, записанных в коммутаторном виде. Тогда их произведение равно $a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} a_4^{x_4} a_5^{x_5} a_6^{x_6} a_7^{x_7} a_8^{x_8} \cdot a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3} a_4^{y_4} a_5^{y_5} a_6^{y_6} a_7^{y_7} a_8^{y_8} = a_1^{z_1} a_2^{z_2} a_3^{z_3} a_4^{z_4} a_5^{z_5} a_6^{z_6} a_7^{z_7} a_8^{z_8}$, где $z_i \in Z_5$ и:

$$z_1 = x_1 + y_1,$$

$$z_2 = x_2 + y_2,$$

$$z_3 = x_3 + y_3 + x_2 y_1,$$

$$z_4 = x_4 + y_4 + x_2 \binom{y_1}{2} + x_3 y_1,$$

$$z_5 = x_5 + y_5 + x_2 y_1 y_2 + \binom{x_2}{2} y_1 + x_3 y_2,$$

$$z_6 = x_6 + y_6 + x_2 \binom{y_1}{3} + x_3 \binom{y_1}{2} + x_4 y_1,$$

$$z_7 = x_7 + y_7 + \binom{x_2}{2} \binom{y_1}{2} + x_2 \binom{y_1}{2} y_2 +$$

$$+ x_3 y_1 y_2 + x_4 y_2 + x_5 y_1,$$

$$z_8 = x_8 + y_8 + \binom{x_2}{3} y_1 + \binom{x_2}{2} y_1 y_2 +$$

$$+ x_2 y_1 \binom{y_2}{2} + x_3 \binom{y_2}{2} + x_5 y_2.$$

Применив алгоритм из разд. 1, найдем функцию роста группы $B_0(2,5,4)$ (табл. 4).

Теорема 4. Относительно порождающего множества A группа $B_0(2,5,4)$ имеет диаметр Кэли, равный 30, а функция роста задана таблицей 4.

Доказательство. Следует из вычислений функции роста группы $B_0(2,5,4)$ по алгоритму из разд. 1.

Группа $B_0(2,5,5)$. Аналогичным образом вычислим функцию роста группы $B_0(2,5,5)$ (табл. 5).

Справедлива следующая

Теорема 5. В алфавите A группа $B_0(2,5,5)$ имеет диаметр Кэли, равный 32, а функция роста задана таблицей 5.

Доказательство. Следует из вычислений функции роста группы $B_0(2,5,5)$ по алгоритму из разд. 1.

Группа $B_0(2,5,6)$. К. А. Филиппов в работе [3] вычислил функцию роста группы $B_0(2,5,6)$ (табл. 6).

Таблица 4

Функция роста группы $B_0(2,5,4)$

Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов
0	1	8	214	16	21923	24	18448
1	2	9	410	17	31600	25	8706
2	4	10	784	18	41954	26	3256
3	8	11	1487	19	50670	27	812
4	16	12	2735	20	54460	28	152
5	30	13	4905	21	51399	29	52
6	58	14	8529	22	42862	30	26
7	112	15	14118	23	30892		
$ B_0(2,5,4) = 5^8 = 390625$							

Таблица 5

Функция роста группы $B_0(2,5,5)$

Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов
0	1	9	410	18	126828	27	887095
1	2	10	784	19	229180	28	487974
2	4	11	1495	20	399742	29	179463
3	8	12	2845	21	658283	30	36089
4	16	13	5409	22	994274	31	3332
5	30	14	10271	23	1332692	32	116
6	58	15	19476	24	1533785		
7	112	16	36732	25	1497003		
8	214	17	68679	26	1253223		
$ B_0(2,5,5) = 5^{10} = 9765625$							

Таблица 6

Функция роста группы $B_0(2,5,6)$

Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов	Длина	Кол-во слов
0	1	12	2847	24	6055431	36	831332170
1	2	13	5417	25	11319139	37	618248452
2	4	14	10303	26	21039700	38	367604796
3	8	15	19602	27	38795471	39	151894200
4	16	16	37254	28	70686385	40	34898104
5	30	17	70751	29	126432849	41	3181218
6	58	18	134224	30	219647100	42	69158
7	112	19	254321	31	364201879	43	800
8	214	20	481252	32	561801464	44	316
9	410	21	909349	33	779044350	45	158
10	784	22	1714866	34	936055279		
11	1495	23	3226931	35	954336955		
$ B_0(2,5,6) = 5^{14} = 6103515625$							

Библиографические ссылки

1. Havas G., Wall G., Wamsley J. The two generated Burnside group of exponent five // Bull. Austral. Math. Soc. 1974. № 10. P. 459–470.
2. Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. Компьютерное моделирование конечных двупорожденных групп периода 5 // Вестник СибГАУ. 2012. № 1 (45). С. 59–62.
3. Филиппов К. А. О диаметре Кэли одной подгруппы группы $B_0(2,5)$ // Вестник СибГАУ. 2012. № 1 (41). С. 234–236.
4. Kuznetsov A. A., Shlepkina A. K. Comparative analysis of the Burnside groups $B(2,5)$ and $B_0(2,5)$ // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. 2010. № 2 (15). P. 111–117.
5. Holt D., Eick B., O'Brien E. Handbook of computational group theory. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press. 2005. 514 p.
6. Sims C. Computation with Finitely Presented Groups. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 628 p.
7. Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. Быстрое умножение элементов в конечных двупорожденных

группах периода пять // Прикладная дискретная математика. 2013. № 1 (18). С. 110–116.

References

1. Havas G., Wall G., Wamsley J. The two generated Burnside group of exponent five // Bull. Austral. Math. Soc., 1974, no. 10, p. 459–470.
2. Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 1 (45), p. 59–62.
3. Philippov K. A. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 1 (41), p. 234–236.
4. Kuznetsov A. A., Shlepkina A. K. Comparative analysis of the Burnside groups $B(2,5)$ and $B_0(2,5)$. Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics, 2010. no. 2 (15), p. 111–117.
5. Holt D., Eick B., O'Brien E. Handbook of computational group theory. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press, 2005, 514 p.
6. Sims C. Computation with Finitely Presented Groups. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 628 p.
7. Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. *Prikl. Diskr. Mat.*, 2013, no. 1 (18), p. 110–116.

© Кузнецова А. С., 2013

УДК 004.9

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ СИНОНИМИЧНЫХ ПОИСКОВЫХ ЗАПРОСОВ НА ОСНОВЕ СЕМАНТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ*

Д. В. Личаргин¹, К. В. Сафонов², О. И. Егорушкин², И. В. Колбасина², Е. Д. Старовойт²

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 26

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: lichdv@hotmail.ru

В работе рассматривается проблема усовершенствования семантических естественно-языковых запросов к поисковым системам. Предлагается модель представления предложений естественного языка в качестве функций пространства с заданными семантизированными координатами. Предложен способ представления процесса порождения синонимичных предложений естественного языка на основе «таблиц синонимизации», модель может позволить порождать классы синонимических предложений на основе базовых предложений из многомерного пространства предложений естественного языка. Затрагивается вопрос об организации интерфейса расширенных синонимизированных семантических запросов к поисковым системам на основе иерархии общих и частных предложений с выделением темы и ремы. Делается вывод о необходимости продолжения данного исследования на основе апробации систем генерации осмысленных предложений.

Ключевые слова. Поисковые системы, компьютерная лингвистика, семантическая классификация, синонимичные запросы к поисковым системам».

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.1010.

IMPLEMENTATION OF THE GENERATION OF SYNONYMIC SEARCH QUERIES BASED ON SEMANTIC CLASSIFICATION

D. V. Lichargin¹, K. V. Safonov², O. I. Egorushkin², I. V. Kolbasina², E. D. Starovoyt²

¹Siberian Federal University

26 Kirenskiy str., Krasnoyarsk, 660074, Russia

¹Siberian State Airspace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: lichdv@hotmail.ru

The article considers the problem of up-grade of the semantic natural language queries to the search engines. The authors offer a model for presentation of sentences of the natural language as functions in a notional space with given semantically assigned coordinates, along with a method of presenting the process of generating synonymous sentences of the natural language based on the "table synonymization" taken from the multidimensional space of a sentence of the natural language. The problem of interface design within expanded synonymized queries to the search engines based on the hierarchy of general and partial sentences within theme- and rheme- parsing is discussed. The conclusion about the necessity to continue the investigation on the basis of testing the systems of meaningful sentences generation is made.

Keywords: search engines, computational linguistics, semantic classification, synonymic requests for search engines.

В работе рассматривается проблема усовершенствования семантических естественно-языковых запросов к поисковым системам с точки зрения перехода от строки запроса к выбору иерархических структур и фрагментов семантической классификации.

На сегодняшний день широко распространены и разрабатываются разнообразные поисковые и метапоисковые системы. Проблема усовершенствования поисковых систем является актуальной в связи с необходимостью получать более системную и упорядоченную информацию в качестве ответов на поисковые запросы продвинутому пользователем.

Проблема генерации осмысленных и, в частности, синонимичных фраз языка решается на стыке таких наук, как лингвистика, компьютерная лингвистика, искусственный интеллект, логика, математика, психология и философия.

Проблема создания программ синонимизаторов и другие проблемы [1–5] давно и широко решаются различными авторами, в частности на основе подстановок слов из списка синонимов.

Однако вопрос о переборе всех трансформаций замкнутых на множестве синонимичных, и расширяемых до множества частично синонимичных фраз, и нахождения множества фраз более абстрактного вида требует дополнительных исследований в рамках теории лексико-грамматических трансформаций.

Цель данной работы состоит в формулировке принципа решения задачи генерации синонимических фраз для генерации синонимических поисковых запросов.

Задачи данной работы заключаются в:

1. Привлечении к решению указанной проблемы семантического словаря, описанного в работе [2].
2. Построении модели множеств линейных соответствий с полным или частичным сохранением не

только осмысленности фразы в целом, но и специфики ее базового содержания.

3. Построения табличного интерфейса в целях генерации синонимических фраз языка.

Основная идея работы состоит в построении модели последовательного умножения дерева разбора (парсинга) строки с поисковым запросом на лексический ряд с прописанными синонимическими значениями.

Новизна работы состоит в использовании модели умножения на «синонимизирующие» ряды слов, основанной на словаре, описанном в работе [2] в применении к созданию генератора поисковых запросов на английском и других языках, например, русском [3] в рамках общей модели естественного языка.

В работе рассматривается проблема представления информации, а именно текста на естественном языке для запросов поисковых систем. Объектом исследования является мультииерархическая система естественного языка (ЕЯ).

Классификация слов и понятий естественного языка. Рассмотрим, многомерное грамматическое пространство единиц естественного языка: слов и предложений.

Такое пространство слов позволяет генерировать грамматически, но не семантически осмысленные фразы естественного языка. Так, фраза «очень он» является грамматически бессмысленной, фраза «карта выключает чашку» – грамматически осмыслена, но семантически бессмысленна, а фраза «девочка выключает компьютер» – грамматически и семантически осмыслена.

Возможно построение многомерного представления данных со следующими координатами вектора понятийного описания.

Таблица 1

Примерный вектор классификации слов и предложений естественного языка

ОПЕРАЦИЯ	ТЕМА (1)			ПОЗИЦИЯ (2)	ВАРИАНТЫ (3)	
	НАД ОБЪЕКТОМ	ЛОКАЛИЗАЦИЯ	СВОЙСТВА		ЛЕКСИЧЕСКАЯ ГРУППА	ЛЕКСИЧЕСКИЕ РЯДЫ
essence сущность	consciousness сознание	of alive часть живого	maximally максимально	nominal group ... именная группа ...	ТОЖЕ, ЧТО В ТЕМЕ (1)	causation ... причина- следствие ...
essence of something сущность чего-то	being существо	in alive в живом	very очень	verbal group... глагольная группа ...		time ... время ...
property свойство	relation отношение	on alive на живом	rather достаточно	bond .. связь ..		existing существующее
link связь	thing вещь	at alive около живого	a little несколько	aspect .. аспект ..		non-existing несуществующее
action действие	information информация	of not alive асть не живого	little мало	property .. качество ..		possible возможный
connecting соединение	idea идея	in not alive в не живом	minimally минимально	system .. система ..		necessary необходимый
presentation представление	place место	on not alive на не живом	...			start начало
changing обмен	relation отношение	at not alive около не живого	positive позитивный			stop остановка
		of which alive часть которого живое	complex сложный			continuation продолжение
		in which alive в котором живое	stable стабильный			И другие
			И другие			

V_1 = Части речи {«Артикль», «Прилагательное», «Существительное», «Глагол», ...};

V_2 = Члены предложения {«Определитель», «Определение», «Подлежащее», «Сказуемое», ...};

$V_{3,3,1}$ = Лица {«1-ое», «2-ое», «3-ее», «Не определено»};

$V_{3,3,2}$ = Аспект {«Неопределенный», «Продолженный», «Совершенный», «Совершенный продолженный», «Не определен»};

$V_{3,1,1}$, $V_{3,1,2}$, ... – Другие размерности, выраженные грамматическими категориями.

L_1 = Объекты по тематике изучения {идеи {науки, представления, чувства ...}, предметы {одежда, еда, части тела, здания, транспорт, ...}, существа, ...};

L_2 = Порядок слов и члены предложения {субъект, предикат, объект};

L_3 = Варианты подстановок слов в предложение {позитивное {обожать, любить}, негативное {не любить, ненавидеть}} (рис. 1).

Такое многомерное пространство включает комбинаторно сочетающиеся группы слов, например, группа слов {читать, писать, копировать, публиковать, иллюстрировать, ...} относится к ячейке многомерного пространства V [СУЩЕСТВИТЕЛЬНОЕ / ИМЕННАЯ ЧАСТЬ / ЧИСЛО-ЕДИНСТВЕННОЕ]- L [ДЕЙСТВИЕ / ПРЕДМЕТ-ИНФОРМАЦИЯ / _].

Грамматические конструкции включаются в ячейки многомерного массива. Пересечение таких координат вектора, как, например V [СУЩЕСТВИТЕЛЬНОЕ /

ОПРЕДЕЛЕНИЕ / СОВЕРШЕННЫЙ / ...], определяет ячейку многомерного массива с грамматической конструкцией: «have + been + VERB-(e)d». Вектор V [Прилагательное / Сказуемое / 1-ое лицо / Сравнительная степень / Длинное слово / ...] = «am more + ПРИЛАГАТЕЛЬНОЕ». Реляционные таблицы как подмножества этого многомерного массива представлены в лингвистике традиционными грамматическими парадигмами.

Семантические же конструкции L [СУЩНОСТЬ-ПРЕДМЕТ-ОДЕЖДА / ДЕЙСТВИЕ / ПОЯВЛЕНИЕ] = «надевать». L [СУЩНОСТЬ-ПРЕДМЕТ-ИНФОРМАЦИЯ / АТРИБУТ / СУЩЕСТВОВАНИЕ] = «содержательный» (документ / книга).

Функции определенного вида (формы) над получаемым векторным пространством образуют осмысленные фразы языка. Необходимо, во-первых, организовать иерархическое множество более общих и более частных по семантике предложений, во вторых задать классы синонимичных и полусинонимичных предложений в рамках классов общности и конкретизации на основе дополнительных признаков.

Примером упорядочения функций осмысленных предложений на понятийном пространстве (см. табл. 1) может служить набор точек:

L [СУЩНОСТЬ-ПРЕДМЕТ-В ЖИВОМ (еда) / ИМЕННАЯ ГРУППА-КАЧЕСТВО (атрибут) / ОЧЕНЬ-ПОЗИТИВ... (отличный)] = {deleicious, aromatic} + L [СУЩНОСТЬ-ПРЕДМЕТ-В ЖИВОМ

(еда) / ИМЕННАЯ ГРУППА-СИСТЕМА (именная часть) / СУЩНОСТЬ-СУЩЕСТВО- _СЛОЖНОЕ (животное)] = {beef, pork, mutton, chicken, ...} + L[СВЯЗЬ-ПРЕДМЕТ-НА НЕЖИВОМ (опора) / ГЛАГОЛЬНАЯ ГРУППА-СИСТЕМА (ГЛАГОЛЬНАЯ ЧАСТЬ) / БОЛЬШОЕ] = {is on, lies on, is situated on, is located on, ...} + «the» + L[СУЩНОСТЬ-ПРЕДМЕТ-НА КОТОРОМ НЕЖИВОЕ / ИМЕННАЯ ГРУППА-СИСТЕМА (именная часть) / БОЛЬШОЙ-ПЛОСКИЙ] = {стол, тумбочка, чайный столик}, где «+» означает конкатенацию семантических векторов. В результате могут быть сформированы предложения вида «вкусная курица лежит на тумбочке», «ароматная рыба находится на столе» и другие см. табл. 1. После решения проблемы генерации фраз приведенного вида в первом приближении необходимо перейти к проблеме их усложнения и порождения множеств синонимичных фраз языка.

Подмножества многомерной классификации осмысленных предложений. Для решения проблемы генерации осмысленных синонимичных друг другу предложений предлагается умножать исходный класс предложений C_i на синонимизирующую группу соответствующего уровня G_i , получая класс следующего за ним уровня C_{i+1} , где $C_i * G_i = C_{i+1}$. Здесь под умножением будем подразумевать преобразование определенного вида над семантическими шаблонами, алгоритмическое описание которого является темой отдельной публикации. Синонимизирующие ряды слов имеют следующий вид:

1. Определения: стремление получить, эмоциональная тенденция, направленность в будущее.
2. По частям речи: желание, желать, желательный, желательно.
3. По позиции в предложении: что-то как желание, быть желанием, что-то желания, с учетом желания.

4. Ряды дифинимов (разные элементы одной речевой ситуации или явления): желающий, объект желания, страстный, вожделенный.

5. Ряд близких синонимов: хотение.

6. Широкий синонимический ряд (с общей 1–3 семами): стремление, нужда, необходимость.

7. Группы слов контекстуальных синонимов (от 1 и более общей семы): важность / значимость / насущность, цель / задача / план, идея / проект / концепция, динамика / направленность / сосредоточение.

8. Метафорические употребления: жажда, алчность, жадность, вожделение.

9. По категориям, например, множественного числа: с желаниями.

10. «Атрибуции»: с множеством желаний, с кучей желаний, с чувством желания, с чувством теплоты / прикосновения / огня желания, с эмоциональным / душевным желанием.

11. Перевод на другой язык: a desire, a wish, to want.

Синонимизирующие ряды слов. Умножение фрагмента многомерного пространства осмысленных предложений языка на синонимизирующие ряды можно представить следующим образом (табл. 2).

Так, в результате генерации при выборе одного из вариантов синонимизации из каждой колонки таблицы возникают фразы вида:

1. «Городской житель имеет необходимость быть предприимчивым с компьютерной системой с учетом рассрочки».
2. «В пространстве городской среды можно ощутить желание обеспечить выполнение покупки аппаратного обеспечения компьютерной техники в рамках рассрочки».
3. «Заклученный в пространство городской среды, горожанин осуществляет желание получить товар, в частности, компьютерную технику с учетом наличия рассрочки».

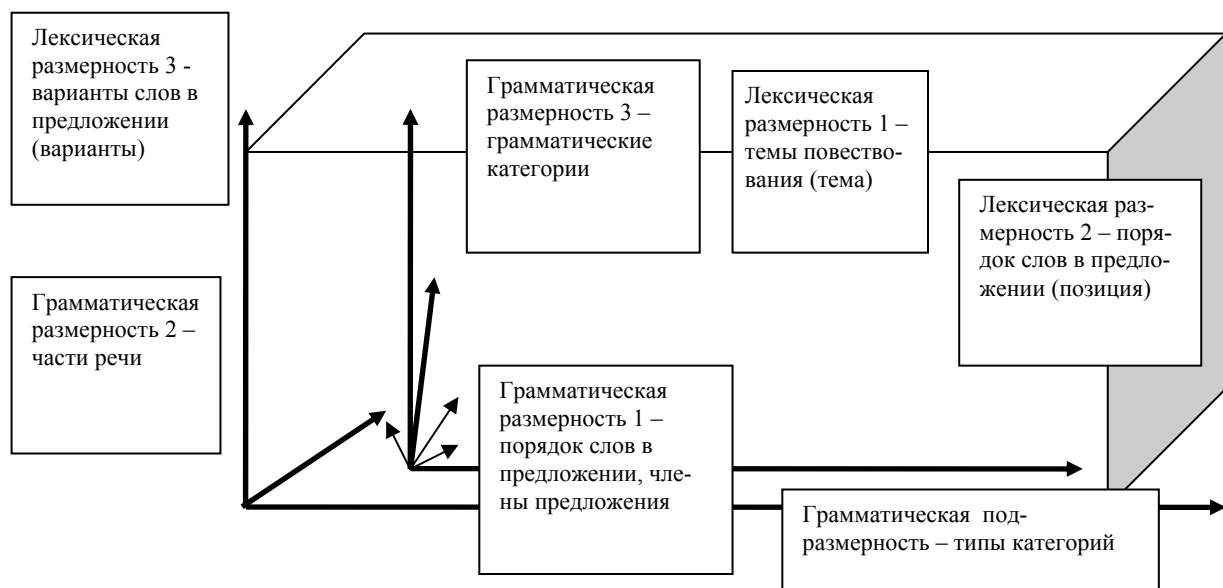


Рис. 1. Координаты многомерного лексико-грамматического пространства

Схема синонимизации фраз естественного языка

Ключевое слово				Компьютер	
Тема – рема			Продать (ТЕМА)	Компьютер (РЕМА)	
Другие уровни	...	...	...	...	...
Значимый ряд	Горожанин (1)	Хочет (2)	Продать (3)	Компьютер (4)	[Не безвозмездно] (5)
Умножение на лексические ряды	Человек из города	Желание	Продать в рассрочку	Компьютера	(По) акции
	Городской человек	Нетерпение	Продавец	Компьютерной системы	(В) рассрочку
	Городской житель	Намерение	Имеет [такой товар] товар [как]	Вычислительной системы	Дешево
	В городе	Необходимость	Предприимчив в операциях с	Средства вычисления	Дорого
	В городском месте <малоупотребительно>	Требование	Арендовать	Средства осуществления операций над информацией	С доставкой
	В городских местах	Желательно	Арендатор		С учетом дороговизны
	В городской среде	По желанию	Продажа		
		С радостью	Проданный		
Внесение атрибуций	В пространстве городской среды	Ощутить желание	Осуществить покупку	Компьютерного оборудования	Во время проведения акции
	В фокусе городского пространства	Ощутить ясность чувства феномена желания	Выполнить покупку	Компьютерной техники	Во время прохождения акции
		Проявил себя через желание	Обеспечить выполнение покупки	Аппаратного обеспечения компьютерной техники	Во время похождения мероприятия – акции

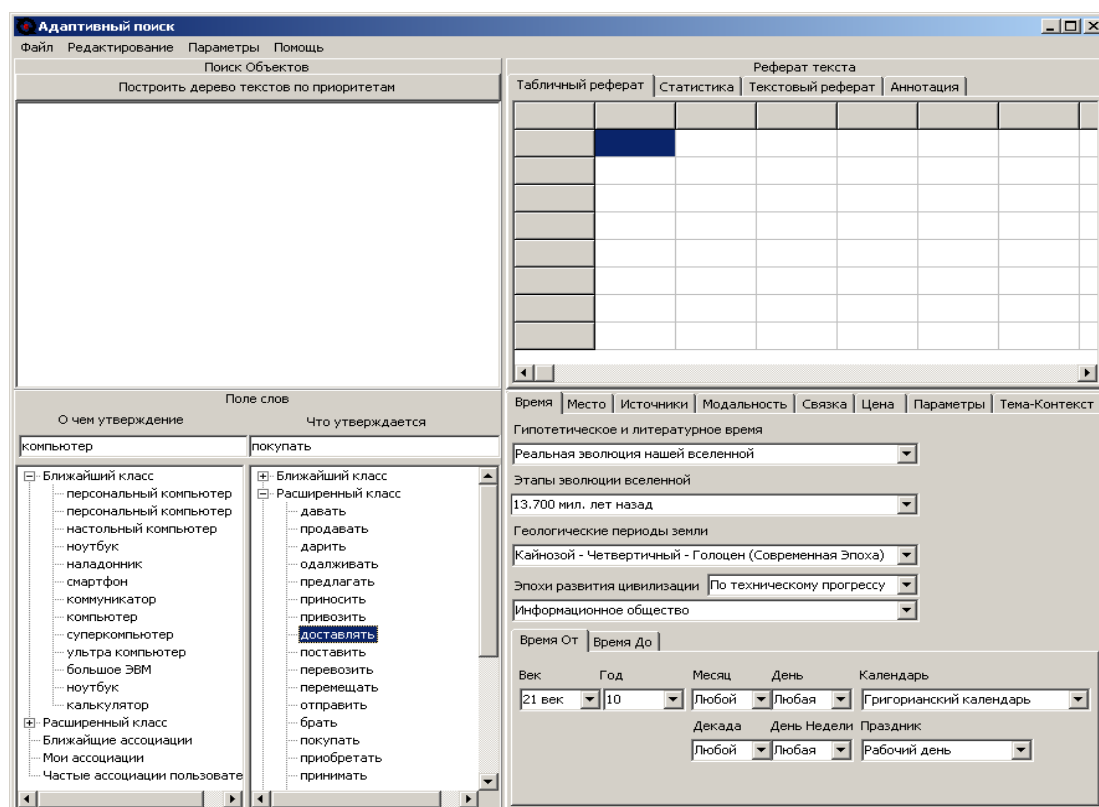


Рис. 2. Интерфейс разрабатываемой программы «Адаптивный Поиск»

Дерево генерации предложений на основе темы и ремы. Традиционно актуальное членение предложений включает в себя деление на тему и ремю, рема является ключевым словом в предложении, а тема относится ко всему тексту или его фрагменту.

На вершине дерева актуального членения стандартного предложения (без синонимизации, декомпрессии и внесения семантического шума) имеет место ключевое слово (рема); на втором уровне дерева парсинга имеет место тема и рема; на третьем имеет место четверка: тема, связка, рема, модальность; на четвертом уровне добавляются обстоятельства, имеющие важную уточняющую функцию. На пятом уровне имеют место очевидные, понятные из контекста обстоятельства и конкретизация; на шестом – полупустые слова, уточняющие аспекты слов, указанных выше в дереве разбора (назовем их «атрибуциями»).

Так, например, анализ предложения вида «Нельзя не отметить, что образец книги австралийского автора, который я читал вчера, далеко не лишен того что можно назвать воплощением пошлости» может происходить в несколько этапов развития ключевого слова «пошлая», далее темы и ремы «книга пошлая» и т. д.

0. Тема повествования: «книга»;

1. Ключевое слово: «пошлая»;

2. Тема-Рема: «книга – пошлость» = «книга – пошлая»;

3. Тема-Рема-Связка-Модальность: «плохо, что книга отличается пошлостью»;

4. Важная конкретизация: «книга австралийского автора»;

5. Контекстуальная конкретизация: «книга, которую я читал вчера»;

6. Атрибуции понятий: «образец книги», «воплощение пошлости»;

7. Различные эквивалентные преобразования, например, двойное отрицание: «далеко не лишена пошлости», «нельзя не отметить, что ...».

Генерация классов синонимичных предложений может быть использована при генерации синонимических запросов к поисковым системам.

В работе выполнен анализ проблемы генерации осмысленных фраз синонимичных и частично синонимичных друг другу. Предложена модель генерации синонимичных фраз на основе таблиц синонимизации, и лексических рядов, генерируемых на основе

семантического векторизованного словаря [2]. Рассматриваются возможности визуального интерфейса поисковых систем на основе модели членения предложения на тему и ремю.

Подчеркивается важность продолжения исследований в области генерации синонимических поисковых запросов.

Библиографические ссылки

1. Avancini H., Lavelli A., Sebastiani F., Zanolì R. Automatic Expansion of Domain-Specific Lexicon by Term Categorization. ACM Translation on Speech and Language Processing. Vol. 3. No. 1. May 2006. P. 1–30.

2. Сафонов К. В., Личаргин Д. В. Elaboration of a vector-based semantic classification over the words and notions of the natural language // Вестник СибГАУ. 2009. № 5 (26). С. 52–56.

3. Личаргин Д. В., Суманеева Я. А., Юрьева Е. В. Метод подстановочных таблиц и его применение в сфере обучения русскому языку для иностранцев // Вестник Сургутского гос. пед. ун-та. 2012. № 6. С. 179–187.

4. Сафонов К. В., Личаргин Д. В. Разработка векторизованной семантической классификации над словами и понятиями естественного языка // Вестник СибГАУ. 2010. № 4. С. 33–37.

5. Сафонов К. В., Личаргин Д. В. Некоторые принципы автоматической генерации учебных материалов на основе баз знаний и лингвистической классификации // Вестник СибГАУ. 2012. № 2 (42). С. 72–77.

References

1. Avancini H., Lavelli A., Sebastiani F., Zanolì R. Automatic Expansion of Domain-Specific Lexicon by Term Categorization. ACM Translation on Speech and Language Processing, Vol. 3, No. 1, May 2006, p. 1–30.

2. Safonov K. V., Lichargin D. V. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 5 (26), pp. 52–56.

3. Lichargin D. V., Sumaneeva Ya. A., Yuryeva E. V. *Vestnik of Surgut GPU*, 2012, № 6, p. 179–187.

4. Safonov K. V., Lichargin D. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 4 (30), p. 33–37.

5. Safonov K. V., Lichargin D. V. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 2 (42), p. 72–77.

© Личаргин Д. В., Сафонов К. В., Егорушкин О. И., Колбасина И. В., Старовойт Е. Д., 2013

УДК 534.121.1

УСТОЙЧИВОСТЬ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПАНЕЛИ СО СВОБОДНЫМ КРАЕМ В СОСТАВЕ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА*

А. В. Лопатин, П. О. Деев, М. А. Рутковская

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: prokhor777@gmail.com

Рассматривается задача определения критического усилия сжатия прямоугольной трехслойной пластины со свободным краем, у которой два противоположных края шарнирно-закреплены, а один край жестко закреплен. В такой постановке задача не имеет до настоящего времени аналитического решения. В данной работе вариационные уравнения устойчивости пластины решены методом Канторовича и обобщенным методом Галеркина. В качестве базисных функций при решении использованы балочные функции специального вида. Получена аналитическая формула для критического усилия трехслойной пластины, по которой вычислены критические усилия для нескольких пластин с различными сочетаниями размеров. Верификация расчета в конечно-элементном пакете показала высокую точность полученной формулы и возможность ее использования в проектировочных расчетах при минимальных вычислительных затратах.

Ключевые слова: трехслойная пластина, критическое усилие, обобщенный метод Галеркина.

STIFFNESS OF THE SANDWICH PANEL WITH FREE EDGE AS A CONSTRUCTIONAL PART OF A SPACECRAFT

A. V. Lopatin, P. O. Deev, M. A. Rutkovskaya

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia
E-mail: prokhor777@gmail.com

The article considers the problem of critical pressure load determination for rectangular sandwich plate with one free edge, two opposite gimbal-mounted edges and one cantilever edge. Gimbal-mounted edges of the plate are under linearly varying load. This problem is not analytically solved yet. In this work the variation equations of plate stability were solved via Kantorovich method and via generalized Galerkin method, with special beam functions as basic functions. The analytical formula for critical pressure load is obtained. Calculations of critical loads for several variants of plates were done using this formula and the results were verified via finite-element package. The verification shows that the analytical formula could be successfully used in engineering and design calculations with minimal computational cost and high accuracy.

Keywords: sandwich plate, critical load, generalized Galerkin method.

При проектировании трехслойных пластин, применяемых в конструкциях космических аппаратов, часто возникает задача расчета устойчивости пластины, когда один из ее краев свободен.

Задача устойчивости такой пластины наиболее подробно изучена для случая, когда к шарнирно закрепленным краям приложена равномерная сжимающая нагрузка.

Вместе с тем большой практический интерес представляет случай, когда к шарнирно закрепленным краям пластины приложены линейно изменяющиеся усилия.

Уравнения устойчивости такой пластины содержат переменный коэффициент, и поэтому их интегрирование оказывается затруднительным. В данной статье решена задача определения критических усилий для трехслойной пластины со свободным краем под действием линейно-изменяющейся нагрузки.

Рассмотрим трехслойную пластину с одинаковыми композитными несущими слоями и ортотропным заполнителем. Два противоположных края пластины шарнирно-оперты, а один край жестко закреплен.

Пластина нагружена в своей плоскости линейно-изменяющимся усилием.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14B37.21.0405.

Запишем выражения для потенциальной энергии деформации трехслойной пластины [1]:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left[D_{11} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right)^2 + 2D_{12} \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \frac{\partial \theta_y}{\partial y} + D_{22} \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right)^2 + D_{33} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right)^2 + K_x \left(\theta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\theta_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (1)$$

и для работы внешних сил:

$$A = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \left[N_x^0 \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2N_{xy}^0 \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} + N_y^0 \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (2)$$

При рассматриваемом нагружении

$$N_x^0 = -N \left(1 - 2 \frac{y}{b} \right), \quad N_{xy}^0 = 0, \quad N_y^0 = 0. \quad (3)$$

Вариация энергии деформированной пластины

$$\begin{aligned} \delta U = & \int_0^b \int_0^a \left[D_{11} \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right] \delta \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right) + \\ & + \left(D_{12} \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + D_{22} \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right) \delta \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right) + D_{33} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} \right) + \\ & + D_{33} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) + K_x \left(\theta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta \theta_x + \\ & + K_x \left(\theta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + K_y \left(\theta_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta \theta_y + \\ & + K_y \left(\theta_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] dx dy. \end{aligned} \quad (4)$$

и вариация работы внешних сил

$$\delta A = -\frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a N \left(1 - 2 \frac{y}{b} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) dx dy \quad (5)$$

Таким образом, получим основное вариационное уравнение деформированной трехслойной пластины

$$\begin{aligned} & \int_0^b \int_0^a \left[D_{11} \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + D_{12} \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right] \delta \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right) + \left(D_{12} \frac{\partial \theta_x}{\partial x} + D_{22} \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right) \times \\ & \times \delta \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right) + D_{33} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} \right) + D_{33} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) \times \\ & \times \delta \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right) + K_x \left(\theta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta \theta_x + K_x \left(\theta_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + \\ & + K_y \left(\theta_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta \theta_y + K_y \left(\theta_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \delta \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) - \\ & - N \left(1 - 2 \frac{y}{b} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] dx dy = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Получим решение уравнения (6) с помощью метода Канторовича и обобщенного метода Галеркина [2; 3].

Согласно методу Канторовича, представим прогиб и углы поворота в следующем виде

$$\begin{aligned} w &= w_m(y) \sin \lambda_m x \quad \theta_x = \theta_{xm}(y) \cos \lambda_m x \\ \theta_y &= \theta_{ym}(y) \sin \lambda_m x \quad \lambda_m = \frac{\pi m}{a} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (7)$$

Подставим (7) в (6) и выполним необходимые преобразования. Тогда получим

$$\begin{aligned} & \int_0^b \left[\left(D_{11} \lambda_m^2 \theta_{xm} - D_{12} \lambda_m \frac{d\theta_{ym}}{dy} \right) \delta \theta_{xm} + \right. \\ & + \left(D_{22} \frac{d\theta_{ym}}{dy} - D_{12} \lambda_m \theta_{xm} \right) \delta \left(\frac{d\theta_{ym}}{dy} \right) + \\ & + D_{33} \left(\frac{d\theta_{xm}}{dy} + \lambda_m \theta_{ym} \right) \delta \left(\frac{d\theta_{xm}}{dy} \right) + \\ & + D_{33} \left(\lambda_m \frac{d\theta_{xm}}{dy} + \lambda_m^2 \theta_{ym} \right) \delta \theta_{ym} + \\ & + K_x (\theta_{xm} + \lambda_m w_m) \delta \theta_{xm} + K_x (\lambda_m \theta_{xm} + \lambda_m^2 w_m) \delta w_m + \\ & + K_y \left(\theta_{ym} + \frac{dw_m}{dy} \right) \delta \theta_{ym} + K_y \left(\theta_{ym} + \frac{dw_m}{dy} \right) \delta \left(\frac{dw_m}{dy} \right) - \\ & \left. - \lambda_m^2 N \left(1 - 2 \frac{y}{b} \right) w_m \delta w_m \right] dy = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее выполним операцию варьирования функционала в уравнении (8), и получим три вариационных уравнения с естественными граничными условиями

$$\begin{aligned} & \int_0^b \left[K_x (\lambda_m \theta_{xm} + \lambda_m^2 w_m) - K_y \left(\frac{d\theta_{ym}}{dy} + \frac{d^2 w_m}{dy^2} \right) - \right. \\ & \left. - \lambda_m^2 N \left(1 - 2 \frac{y}{b} \right) w_m \right] \delta w_m dy + \left[K_y \left(\theta_{ym} + \frac{dw_m}{dy} \right) \delta w_m \right]_0^b = 0, \\ & \int_0^b \left[K_x (\theta_{xm} + \lambda_m w_m) + \left(D_{11} \lambda_m^2 \theta_{xm} - D_{12} \lambda_m \frac{d\theta_{ym}}{dy} \right) - \right. \\ & - D_{33} \left(\frac{d^2 \theta_{xm}}{dy^2} + \lambda_m \frac{d\theta_{ym}}{dy} \right) \right] \delta \theta_{xm} dy + \\ & + \left[D_{33} \left(\frac{d\theta_{xm}}{dy} + \lambda_m \theta_{ym} \right) \delta \theta_{xm} \right]_0^b = 0, \\ & \int_0^b \left[K_y \left(\theta_{ym} + \lambda_m \frac{dw_m}{dy} \right) - \left(D_{22} \frac{d^2 \theta_{ym}}{dy^2} - D_{12} \lambda_m \frac{d\theta_{xm}}{dy} \right) + \right. \\ & + D_{33} \left(\lambda_m \frac{d\theta_{xm}}{dy} + \lambda_m^2 \theta_{ym} \right) \right] \delta \theta_{ym} dy + \\ & + \left[\left(D_{22} \frac{d\theta_{ym}}{dy} - D_{12} \lambda_m \theta_{xm} \right) \delta \theta_{ym} \right]_0^b = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Решим систему вариационных уравнений (9) обобщенным методом Галеркина. В соответствии с этим, представим прогиб и углы поворота в следующем виде

$$\begin{aligned} w_m &= A_m U_y(y), \quad \theta_{xm} = B_m U_y(y), \\ \theta_{ym} &= C_m V_y(y), \end{aligned} \quad (10)$$

здесь A_m , B_m , C_m – неизвестные числа, подлежащие определению; $U_y(y)$, $V_y(y)$ – известные функции, аппроксимирующие прогиб и углы поворотов. Эти функции имеют вид

$$\begin{aligned} U_y(y) &= \frac{y}{b} \left[\frac{y^3}{b^3} - 4 \frac{y^2}{b^2} + 6 \frac{y}{b} - 12 \gamma_y \left(\frac{y}{b} - 2 \right) \right], \\ V_y(y) &= \frac{y}{b} \left(\frac{y^2}{3b^2} - \frac{y}{b} + 1 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

где $\gamma_y = \frac{K_y b^2}{D_{22}}$.

Вариации функций (11) будут

$$w_m = U_y \delta A_m, \quad \theta_{xm} = U_y \delta B_m, \quad \theta_{ym} = V_y \delta C_m. \quad (12)$$

Подставив (10) в (9), с учетом (12), получим

$$\begin{aligned} & \int_0^b \left[K_x (\lambda_m B_m U_y + \lambda_m^2 A_m U_y) - K_y \left(C_m \frac{dV_y}{dy} + A_m \frac{d^2 U_y}{dy^2} \right) - \right. \\ & \quad \left. - \lambda_m^2 N \left(1 - 2 \frac{y}{b} \right) A_m U_y \right] U_y \delta A_m dy + \\ & \quad + \left[K_y \left(C_m V_y + A_m \frac{dU_y}{dy} \right) U_y \delta A_m \right]_0^b = 0, \\ & \int_0^b \left[K_x (B_m U_y + \lambda_m A_m U_y) + \left(D_{11} \lambda_m^2 B_m U_y - D_{12} \lambda_m C_m \frac{dV_y}{dy} \right) - \right. \\ & \quad \left. - D_{33} \left(B_m \frac{d^2 U_y}{dy^2} + \lambda_m C_m \frac{dV_y}{dy} \right) \right] U_y \delta B_m dy + \\ & \quad + \left[D_{33} \left(B_m \frac{dU_y}{dy} + \lambda_m C_m V_y \right) U_y \delta B_m \right]_0^b = 0, \\ & \int_0^b \left[K_y \left(C_m V_y + A_m \frac{dU_y}{dy} \right) - \left(D_{22} C_m \frac{d^2 V_y}{dy^2} - D_{12} \lambda_m B_m \frac{dU_y}{dy} \right) + \right. \\ & \quad \left. + D_{33} \left(\lambda_m B_m \frac{dU_y}{dy} + \lambda_m^2 C_m V_y \right) \right] V_y \delta C_m dy + \\ & \quad + \left[\left(D_{22} C_m \frac{dV_y}{dy} - D_{12} \lambda_m B_m U_y \right) V_y \delta C_m \right]_0^b = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

Учитывая произвольность вариаций δA_m , δB_m и δC_m получим систему разрешающих уравнений обобщенного метода Галеркина в следующем виде

$$\begin{aligned} & A_m \left(K_x \lambda_m^2 \int_0^b U_y^2 dy - K_y \int_0^b U_y \frac{d^2 U_y}{dy^2} dy + K_y \left[U_y \frac{dU_y}{dy} \right]_0^b \right) + \\ & \quad + B_m K_x \lambda_m \int_0^b U_y^2 dy - C_m \left(K_y \int_0^b U_y \frac{dV_y}{dy} dy - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. - K_y \left[V_y U_y \right]_0^b \right) - A_m \lambda_m^2 N \int_0^b \left(1 - 2 \frac{y}{b} \right) U_y^2 dy = 0 \\ & A_m K_x \lambda_m \int_0^b U_y^2 dy + B_m \left(K_x \int_0^b U_y^2 dy + D_{11} \lambda_m^2 \int_0^b U_y^2 dy - \right. \\ & \quad \left. - D_{33} \int_0^b U_y \frac{d^2 U_y}{dy^2} dy + D_{33} \left[U_y \frac{dU_y}{dy} \right]_0^b \right) - \\ & \quad - C_m \left(D_{12} \lambda_m \int_0^b U_y \frac{dV_y}{dy} dy + D_{33} \lambda_m \int_0^b U_y \frac{dV_y}{dy} dy - \right. \\ & \quad \left. - D_{33} \lambda_m \left[U_y V_y \right]_0^b \right) = 0, \\ & A_m K_y \int_0^b V_y \frac{dU_y}{dy} dy + B_m \left(D_{12} \lambda_m \int_0^b V_y \frac{dU_y}{dy} dy + \right. \\ & \quad \left. + D_{33} \lambda_m \int_0^b V_y \frac{dU_y}{dy} dy - D_{12} \lambda_m \left[U_y V_y \right]_0^b \right) + \\ & \quad + C_m \left(D_{33} \lambda_m^2 \int_0^b V_y^2 dy - D_{22} \int_0^b V_y \frac{d^2 V_y}{dy^2} dy + \right. \\ & \quad \left. + K_y \int_0^b V_y^2 dy + D_{22} \left[V_y \frac{dV_y}{dy} \right]_0^b \right) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Введем обозначения входящих в уравнения (14) интегралов и безынтегральных членов

$$\begin{aligned} I_{1y} &= \int_0^b U_y^2 dy; \quad J_{1y} = \int_0^b V_y^2 dy; \\ I_{2y} &= \int_0^b U_y \frac{d^2 U_y}{dy^2} dy; \quad J_{2y} = \int_0^b V_y \frac{d^2 V_y}{dy^2} dy; \\ I_{3y} &= \int_0^b U_y \frac{dV_y}{dy} dy; \quad J_{3y} = \int_0^b V_y \frac{dU_y}{dy} dy; \\ \bar{I}_{1y} &= \int_0^b \left(1 - 2 \frac{y}{b} \right) U_y^2 dy; \end{aligned} \quad (15)$$

$$R_{1y} = \left[U_y V_y \right]_0^b; \quad R_{2y} = \left[U_y \frac{dU_y}{dy} \right]_0^b; \quad R_{3y} = \left[V_y \frac{dV_y}{dy} \right]_0^b.$$

Численные значения интегралов и безынтегральных членов (15) будут

$$\begin{aligned} I_{1y} &= \frac{8b}{315} \gamma_{1y}; \quad J_{1y} = \frac{b}{14}; \quad I_{2y} = -\frac{12}{35b} \gamma_{2y}; \\ J_{2y} &= -\frac{1}{5b}; \quad I_{3y} = \frac{\gamma_{3y}}{35}; \quad J_{3y} = \frac{\gamma_{3y}}{35}; \\ J_{3y} &= \frac{6}{35} \gamma_{3y}; \quad \bar{I}_{1y} = -\frac{2b}{315} \gamma_{1y}; \quad R_{1y} = \gamma_{1y}; \\ R_{2y} &= \frac{12}{b} \gamma_{1y}; \quad R_{3y} = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \gamma_{1y} &= 91 + 999 \gamma_y + 3024 \gamma_y^2; \\ \gamma_{2y} &= -5 + 28 \gamma_y + 560 \gamma_y^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_{1y} &= 220 + 2043\gamma_y + 4536\gamma_y^2; \\ \bar{\gamma}_{1y} &= 1 + 4\gamma_y; \quad \bar{\gamma}_{3y} = 5 + 14\gamma_y; \quad \gamma_{3y} = 5 + 56\gamma_y. \end{aligned} \quad (17)$$

Принимая во внимание, что $R_{1y} - I_{3y} = J_{3y}$, и подставляя (16) в (14), получим систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных чисел A_m , B_m и C_m

$$\begin{aligned} &\left(K_x \lambda_m^2 \frac{8b}{315} \gamma_{1y} + K_y \frac{12}{35b} \gamma_{2y} + K_y \frac{12}{b} \gamma_{1y} \right) A_m + \\ &+ K_x \lambda_m \frac{8b}{315} \gamma_{1y} B_m + K_y \frac{6}{35} \gamma_{3y} C_m - \lambda_m^2 N \frac{2b}{315} \gamma_{1y} A_m = 0, \\ &K_x \lambda_m \frac{8b}{315} \gamma_{1y} A_m + \left(K_x \frac{8b}{315} \gamma_{1y} + D_{11} \lambda_m^2 \frac{8b}{315} \gamma_{1y} + \right. \\ &\quad \left. + D_{33} \frac{12}{35b} \gamma_{2y} + D_{33} \frac{12}{b} \gamma_{1y} \right) B_m + \\ &\quad + \left(D_{33} \lambda_m \frac{6}{35} \gamma_{3y} - D_{12} \lambda_m \frac{\gamma_{3y}}{35} \right) C_m = 0, \\ &K_y \frac{6}{35} \gamma_{3y} A_m + \left(D_{33} \lambda_m \frac{6}{35} \gamma_{3y} - D_{12} \lambda_m \frac{\gamma_{3y}}{35} \right) B_m + \\ &\quad + \left(K_y \frac{b}{14} + D_{22} \frac{1}{5b} + D_{33} \frac{b}{14} \lambda_m^2 \right) C_m = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Приведем систему (18) к удобному для вычислений безразмерному виду. Для этого умножим обе части каждого уравнения на величину $\frac{315b}{2\lambda_m^2 \sqrt{D_{11}D_{22}}}$, и, обозначив $F_{xm} = aB_m$ и $F_{ym} = bC_m$, получим следующее матричное уравнение

$$\mathbf{A}\mathbf{F} = \mathbf{O} \quad (19)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{Bmatrix} a_{11} - \eta b_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{Bmatrix}; \\ \mathbf{F} &= \begin{Bmatrix} A_m \\ F_{xm} \\ F_{ym} \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{O} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \end{aligned} \quad (20)$$

Элементы матрицы $\mathbf{A}$ имеют вид

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left(4\gamma_{1y}\gamma_x r + \frac{54\gamma_{2y}\gamma_y}{\pi^2 m^2 r} + \frac{1890\bar{\gamma}_{1y}\gamma_y}{\pi^2 m^2 r} \right); \\ b_{11} &= \gamma_{1y}; \quad a_{12} = \frac{4\gamma_{1y}\gamma_x r}{\pi m}; \quad a_{13} = \frac{27\bar{\gamma}_{3y}\gamma_y}{\pi^2 m^2 r}; \\ a_{21} &= a_{12}; \\ a_{22} &= \left(\frac{4\gamma_{1y}\gamma_x r}{\pi^2 m^2} + 4\gamma_{1y} r + \frac{54\gamma_{2y}r_{33}}{\pi^2 m^2} + \frac{1890\bar{\gamma}_{1y}r_{33}}{\pi^2 m^2} \right); \\ a_{23} &= \left(\frac{27\bar{\gamma}_{3y}r_{33}}{\pi m} - \frac{9\gamma_{3y}r_{12}}{2\pi m} \right); \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} a_{31} &= a_{13}; \quad a_{32} = a_{23}; \\ a_{33} &= \left(\frac{45\gamma_y}{2\pi^2 m^2 r} + \frac{63}{\pi^2 m^2 r} + \frac{45r_{33}}{2} \right). \end{aligned}$$

Величина η , входящая в уравнение (19) и определяемая равенством

$$\eta = \frac{Nb^2}{\sqrt{D_{11}D_{22}}} \quad (22)$$

называется безразмерным коэффициентом устойчивости трехслойной пластины.

Однородная система (19) будет иметь нетривиальное решение только тогда, когда будет выполнено условие

$$\det(\mathbf{A}) = 0. \quad (23)$$

Решив уравнение (23), получим аналитическое выражение параметра η , которое после упрощения с учетом равенств (28) примет следующий вид

$$\eta = \frac{a_{11}a_{22}a_{33} + 2a_{12}a_{12}a_{23} - a_{11}a_{23}^2 - a_{22}a_{13}^2 - a_{33}a_{12}^2}{b_{11}(a_{33}a_{22} - a_{23}^2)}. \quad (24)$$

Величина η зависит от числа полуволн деформации m вдоль оси ординат. Точке бифуркации формы равновесия пластины, очевидно, соответствует такое m , при котором η принимает минимальное значение. Это значение и будет соответствовать критическому коэффициенту устойчивости пластины $\eta_{кр}$.

При известном значении $\eta_{кр}$, из равенства (22) определим критическое усилие для трехслойной пластины

$$N_{кр} = \eta_{кр} \frac{\sqrt{D_{11}D_{22}}}{b^2}. \quad (25)$$

В качестве примера расчета, определим критическое усилие для трехслойной пластины, с рассматриваемым закреплением краев. Суммарная толщина несущих слоев пластины принимает значения $t = 0.001, 0.002$ м; толщина слоя заполнителя $h = 0.01, 0.05, 0.1$ м.

Материал несущих слоев характеризуется модулями Юнга $E_x = E_y = 54.55$ ГПа, модулями сдвига $G_{xy} = 20.67$ ГПа, $G_{xz} = G_{yz} = 3.78$ ГПа, и коэффициентами Пуассона $\nu_{xy} = 0.32, \nu_{yx} = 0.32$. Материал заполнителя характеризуется только модулями сдвига $G_{xz} = 440$ МПа, $G_{yz} = 220$ МПа. Размеры пластины в плане: $a = 0.5; 1; 1.5; 2; 3; 5$ м; $b = 1$ м. Результаты расчетов для пластины представлены в табл. 1.

Верификация результатов расчета критического усилия выполнена в конечно-элементном пакете COSMOS/M с помощью конечного элемента SHELL4L [4] (табл. 2). Сравнение результатов обоих расчетов позволяет сделать вывод о достаточной точности предлагаемого метода, так как расхождение результатов не превышает 5 %.

Таблица 1

Критические усилия для трехслойной пластины

Параметр			$a, \text{ м; } (b=1 \text{ м})$					
			0.5	1	1.5	2	3	5
$h, \text{ м; } (t = 0.001 \text{ м})$	0.01	$\eta_{кр}$	75.402	28.766	22.358	22.846	22.358	22.086
		$N_{кр}, \text{ кН/м}$	114.08	43.524	33.828	34.566	33.828	33.416
		m	1	1	1	1	2	3
	0.05	$\eta_{кр}$	71.962	28.616	22.441	22.963	22.441	22.189
		$N_{кр}, \text{ кН/м}$	2577.8	1025.1	803.88	822.61	803.88	794.86
		m	1	1	1	1	2	3
	0.1	$\eta_{кр}$	67.838	28.347	22.474	23.045	22.474	22.250
		$N_{кр}, \text{ кН/м}$	9909.6	4140.8	3283.0	3366.4	3283.0	3250.2
		m	1	1	1	1	2	3

Таблица 2

Критические усилия для трехслойной пластины, вычисленные МКЭ

Параметр			$a, \text{ м; } (b=1 \text{ м})$					
			0.5	1	1.5	2	3	5
$h, \text{ м; } (t = 0.001 \text{ м})$	0.01	$N_{кр}, \text{ кН/м}$	111.13	42.611	33.342	34.169	33.394	33.047
		m	1	1	1	1	2	3
	0.05	$N_{кр}, \text{ кН/м}$	2493.7	996.57	786.76	807.61	787.88	780.53
		m	1	1	1	1	2	3
	0.1	$N_{кр}, \text{ кН/м}$	9621.2	3997.8	3190.6	3281.4	3195.3	3169.2
		m	1	1	1	1	2	3

Таким образом, решена задача определения критических усилий трехслойной пластины со свободным краем, у которой два противоположных края шарнирно-закреплены, а один край жестко закреплен. Для решения уравнений устойчивости был использован метод Канторовича и обобщенный метод Галеркина. Выполнена верификация полученного аналитического решения, показавшая, что определение критических усилий может быть выполнено с достаточной инженерной точностью без значительных вычислительных затрат. Поэтому полученные формулы могут быть полезными при проектировании трехслойных пластин.

Библиографические ссылки

1. Vasiliev V. V. Mechanics of composite structures. Taylor & Francis, 1993.
2. Kantorovich L. V., Krylov V. I. Approximate methods of higher analysis. New York : John Wiley & Sons, 1958.

3. Королев В. И. Слоистые анизотропные пластинки и оболочки из армированных пластмасс. М. : Машиностроение, 1965.

4. COSMOS/M: User Guide // Structural Research & Analysis Corporation, 2003.

References

1. Vasiliev V. V. Mechanics of composite structures. Taylor & Francis, 1993.
2. Kantorovich L. V., Krylov V. I. Approximate methods of higher analysis. New York : John Wiley & Sons, 1958.
3. Korolyov V. I. Sloistye anizotropnye plastinki i obolochki iz armirovannykh plastmass (Laminate anisotropic plates and shells made of fiber reinforced plastics). Moscow : Mashinostroenie, 1965.
4. COSMOS/M: User Guide // Structural Research & Analysis Corporation, 2003.

© Лопатин А. В., Деев П. О., Рутковская М. А., 2013

**РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННЫХ АНТЕННЫХ РЕФЛЕКТОРОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ:
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ***

А. В. Лопатин, К. А. Пасечник, А. Ю. Власов, А. В. Шатов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: fnv2001@gmail.com

Рассматривается задача создания с помощью конечно-элементного моделирования методики проектирования высокоточного рефлектора космического аппарата, изготовленного из композиционного материала. Рефлектор представляет собой интегральную конструкцию, все элементы которой изготавливаются за один технологический цикл. Выполнен анализ влияния на жесткость и прочность рефлектора геометрических параметров подкрепляющих элементов. Продемонстрированы технологически реализуемые способы уменьшения деформативности конструкции рефлектора. Разработана методика увеличения жесткости рефлектора за счет использования подкрепляющих элементов. Полученные результаты могут найти применение при проектировании реальных конструкций параболических рефлекторов, используемых на космических аппаратах.

Ключевые слова: параболический рефлектор, космический аппарат, композиционный материал, метод конечных элементов.

**DEVELOPMENT OF COMPOSITE PRECISION SATELLITE REFLECTOR:
FINITE ELEMENT CONSTRUCTION MODELING**

A. V. Lopatin, K. A. Pasechnik, A. Yu. Vlasov, A. V. Shatov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia
E-mail: fnv2001@gmail.com

The authors consider the problem of development of the highly accurate spacecraft reflector made of the composite material using the finite element modeling. The reflector is an integrated construction, all elements of which are made within the same process cycle. The analysis of the effect of the geometrical parameters of the reinforcing elements on the stiffness and strength of the reflector is performed. Technologically implemented ways of reduction of deformability of design of the reflector are described. The technique of the reflector strength increase using the reinforcing elements is developed. The results can be used in design of the real constructions of parabolic reflectors used for the spacecrafts.

Keywords: parabolic reflector, spacecraft, composite material, finite-element method.

При выведении космического аппарата на орбиту рефлектор крепится к его корпусу в точках зачекочки. Закрепленный рефлектор должен обладать определенной частотой. Точки зачекочки располагаются на силовой панели космического аппарата.

Выбор мест крепления рефлектора может осуществляться с помощью модального анализа. В этом случае критерием жесткости будет являться первая частота колебаний закрепленного рефлектора. Изменяя положение мест крепления рефлектора, можно увеличивать или уменьшать его основную частоту колебаний. Отметим, что расположение точек зачекочки ограничено габаритами панели космического аппарата.

Для проведения модального анализа была разработана конечно-элементная модель гладкого композит-

ного рефлектора с использованием программного комплекса FEMAP пакета MSC Nastran [1]. Диаметр апертуры рефлектора 1330 мм. Глубина зеркала 190 мм.

Зеркало рефлектора и его силовая окантовка моделировались элементами *Laminate*. Этот элемент состоит из нескольких слоев композиционного материала, каждый из которых обладает своей толщиной и упругими параметрами.

Общий вид конечно-элементной модели рефлектора показан на рис. 1.

Анализ рефлектора был выполнен для нескольких вариантов точечного закрепления. В первом из них рефлектор крепился к космическому аппарату в четырех равноудаленных точках, расположенных на подкрепляющем канте.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.513.11.0013 от 11 марта 2013 г.

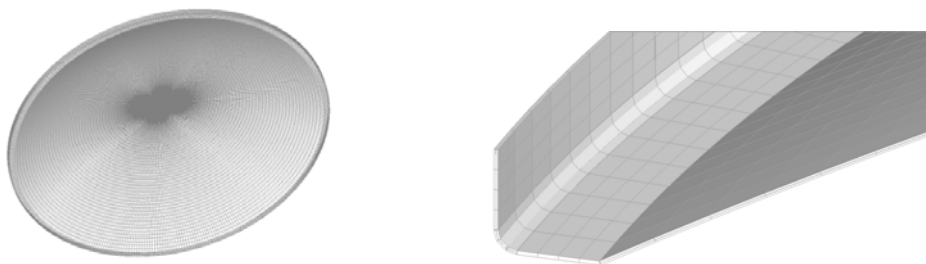


Рис. 1. Конечно-элементная модель рефлектора

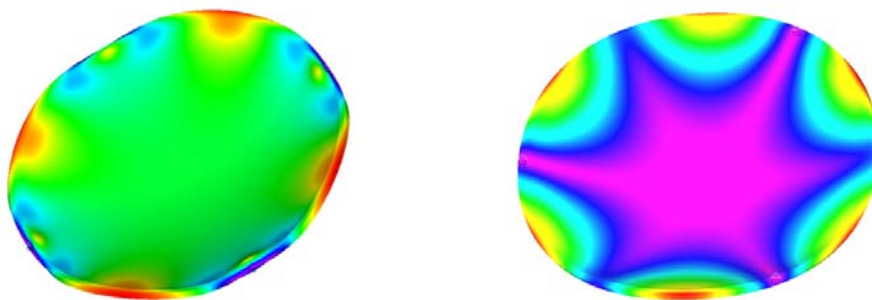


Рис. 2. Первые формы колебаний рефлектора с четырьмя и тремя точками зачековки

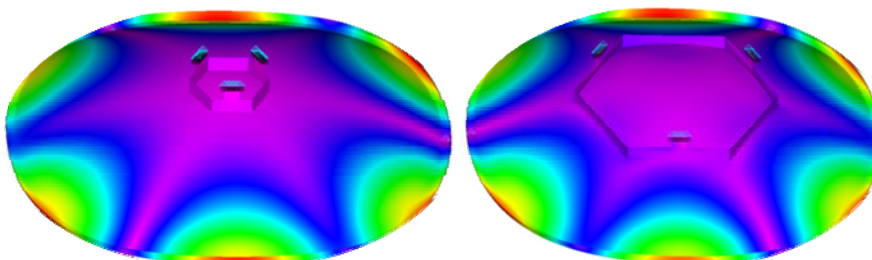


Рис. 3. Формы колебаний рефлектора с соединительным элементом

В местах зачековки ограничивались три перемещения. Для изготовления рефлектора была использована углепластиковая ткань со следующими параметрами: $E_1 = 50$ ГПа, $E_2 = 50$ ГПа, $G_{12} = 4$ ГПа, $\nu_{12} = 0.31$, $\rho = 1500$ кг/м³ [2]. Толщина оболочки рефлектора 1 мм. Во втором варианте схема крепления включала три точки зачековки на канте, расстояние между которыми составляло одну треть длины периметра зеркала.

Был выполнен расчет первой частоты колебаний рефлектора для различных вариантов расположения точек зачековки. Соответствующие формы колебаний приведены на рис. 2.

Рефлектор, закрепленный в четырех точках на окаймляющем канте, имеет первую частоту 103.6 Гц. Вариант с тремя точками зачековки обладает частотой 61.1 Гц. Рефлектор, закрепленный в трех точках, обладает сам по себе достаточной жесткостью в транспортировочной конфигурации. Рефлектор соединяется со штангой, с помощью которой он приводится в рабочее положение после выведения космического аппарата на орбиту. При проектировании антенны необходимо выполнить анализ влияния конструкции соединяющего элемента на жесткость рефлектора.

В качестве такого элемента рассматривается шестигранная призма, выполненная за единое целое с рефлектором. Этот элемент выполнен из того же материала, что и рефлектор. Элемент нижней гранью жестко крепится к рефлектору. Крепление к штанге осуществляется с помощью трех пластин, расположенных на гранях призмы. Верхние края пластин закреплены таким образом, что на них отсутствуют все перемещения. Такие граничные условия имитируют соединение рефлектора и штанги. Основным изменяемым параметром в задаче является размер шестигранника в плане, т. е. диаметр в который он вписывается. Минимальный размер шестигранника в плане (или его диаметр) равен 250 мм. Максимальный размер шестигранника определяется из условия, что его верхняя кромка совпадала с вершиной зеркала.

В работе выполнен модальный анализ конструкции, состоящей из рефлектора и шестигранного соединительного элемента. Рефлектор закреплен в трех точках, расположенных на канте. На верхних краях пластин соединительного элемента, выполненного за единое целое с рефлектором, отсутствуют перемещения. Частота колебаний конструкции с шестигранной призмой минимального размера равна 62 Гц. Увеличе-

ние размера соединительного элемента приводит к увеличению первой частоты колебаний. В этом случае ее величина равна 75.6 Гц. Формы колебаний рефлектора с рассматриваемым способом закрепления показаны на рис. 3.

При выведении космического аппарата на орбиту на его конструктивные элементы действуют значительные объемные силы, обусловленные полетными перегрузками. В работе был выполнен анализ перемещений и напряжений, возникающих в рефлекторе, для случая, когда перегрузка достигает величины 20g. Отметим, что такая перегрузка действует одновременно вдоль оси рефлектора и перпендикулярно оси рефлектора. На рис. 4 показаны перемещения конструкции с шестигранной призмой минимального размера. Максимальное перемещение равно 0.612 мм.

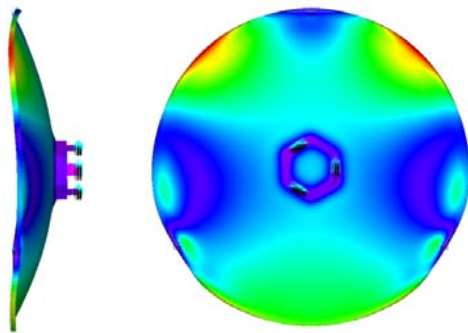


Рис. 4. Перемещения рефлектора с соединительным элементом минимального размера

Картина деформирования рефлектора, соединительный элемент которого имеет максимальный размер, показана на рис. 5. Наибольшее перемещение этой конструкции равно 0.587 мм.

Напряжения, возникающие в конструкции, показаны на рис. 6. Как видно из этих рисунков максимальные напряжения реализуются в точке зачековки, расположенной на канте рефлектора. Для рефлектора с соединительным элементом минимального размера, напряжение равно 47.7 МПа. В конструкции, соединительный элемент которой имеет максимальный размер, максимальное напряжение в точке зачековки равно 31 МПа.

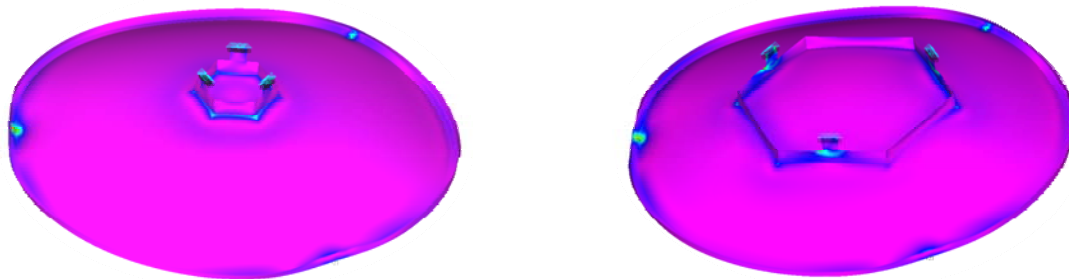


Рис. 6. Распределение напряжений в конструкции рефлектора

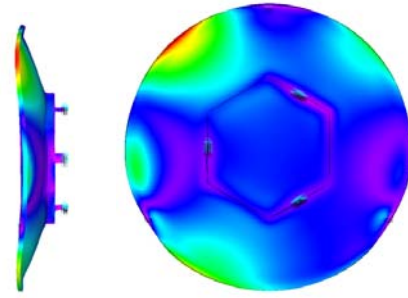


Рис. 5. Перемещения рефлектора с соединительным элементом максимального размера

Таким образом, выполненные изыскания позволяют сделать вывод о целесообразности использования в конструкции шестигранного соединительного элемента максимального возможного размера, когда его верхняя кромка находится на одном уровне с вершиной зеркала.

В работе выполнен модальный анализ и расчет напряженно-деформированного состояния рефлектора с присоединенной массой. Такая модель призвана имитировать влияние инерционных параметров штанги на жесткость и прочность конструкции рефлектора. Зеркало рефлектора по-прежнему закреплено от перемещений в трех точках окантовывающего обода. Тильная сторона оболочки рефлектора усилена ребрами в виде тонкостенной шестигранной призмы. К пластине призмы с помощью жесткой связи (элемент *rigid*) присоединена сосредоточенная масса (элемент *mass*). Расчеты были выполнены для массы, принимающей значения $m = 3$ кг.

В качестве первого шага был проведен модальный анализ рассматриваемой конструкции. На рис. 7 представлены первые формы колебаний рефлектора с $m = 3$ кг для двух размеров соединительного элемента. Частота колебаний рефлектора с минимальным размером соединительного элемента равна 61.21 Гц. В том случае, когда соединительный элемент имеет максимальный размер, основная частота колебаний рефлектора становится равной 64.4 Гц. Отметим здесь определенное снижение частот колебаний конструкции по сравнению с вариантом, в котором отсутствовала присоединенная масса, а верхние кромки тонкостенной призмы были закреплены от перемещений.

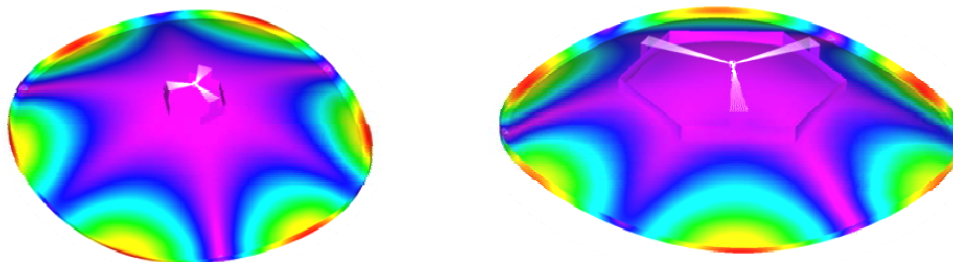


Рис. 7. Формы колебаний рефлектора с присоединенной массой

В качестве следующего шага были определены перемещения, возникающие в рефлекторе при действии на конструкцию массовых сил. Перегрузка равная 20g действует вдоль двух осей рефлектора. На рис. 8 показана картина деформирования рефлектора, шестигранная подкрепляющая призма которого имеет минимальный размер, а присоединенная масса $m = 1$ кг. Максимальные перемещения (1.88 мм) возникают на кромке рефлектора.

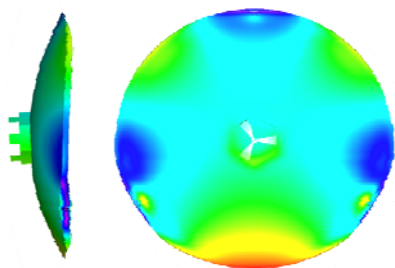


Рис. 8. Перемещения рефлектора с соединительным элементом минимального размера

Картина деформирования рефлектора, шестигранная подкрепляющая призма которого имеет максимальный размер, а присоединенная масса $m = 3$ кг приведена на рис. 9. Максимальные перемещения в этом случае равны 1.85 мм.

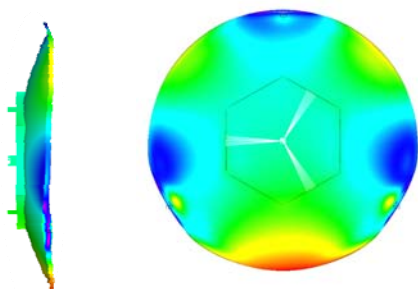


Рис. 9. Перемещения рефлектора с соединительным элементом максимального размера

В работе был выполнен расчет напряжений, возникающих в рефлекторе с присоединенной массой. На рис. 10 показано распределение напряжений в рефлекторах с различными размерами соединительного элемента. Из рисунков видно, что максимальные напряжения от действия массовых сил возникают в ок-

рестности точек зачекочки. Величины этих напряжений соответственно равны 368.7 МПа и 363.9 МПа.

Анализ полученных результатов позволяет сделать определенные выводы о влиянии присоединенной массы и ее величины на деформирование рефлектора. Модель конструкции с массой обладает меньшей частотой колебаний, чем модель с закрепленным по верхним кромкам соединительным элементом. Заметное влияние присоединенная масса оказывает на перемещения и напряжения рефлектора, нагруженного массовыми усилиями. Рассматриваемая модель имеет перемещения заметно большие, чем толщина оболочки рефлектора. Напряжения, возникающие в конструкции, приближаются к пределам прочности рассматриваемого материала.

В качестве следующего шага в работе исследуется возможность увеличения жесткости рефлектора с присоединенной массой за счет использования радиальных ребер. Эти ребра соединяют вершины шестигранной призмы и окаймляющего канта рефлектора. Рассмотрим далее пошаговое формирование конечно-элементной модели такой конструкции. Первоначально, на основе исходных данных, создается геометрическая модель сегмента параболического рефлектора с подкрепляющим элементом. На основе геометрической модели создается конечно-элементная модель сегмента параболического рефлектора. Для моделирования зеркала рефлектора и подкрепляющего элемента был использован оболочечный элемент *laminat*. Размер и форма конечных четырехугольных и треугольных элементов выбирались из требования наиболее корректного описания геометрии сегмента рефлектора. Основное требование к форме элемента предполагает, что углы четырехугольного конечного элемента по возможности должны быть близкими к 90° , а углы треугольного конечного элемента не должны значительно отличаться от 60° . Копируя конечно-элементную модель сегмента рефлектора вокруг продольной оси, получим полную конечно-элементную модель конструкции для создания жесткой связи и сосредоточенной массы используются элементы типа *rigid* и *mass*. Радиальные ребра, идущие от вершин шестигранной призмы к канту рефлектора, моделируются также оболочечными элементами. На рис. 11 показана полная конечно-элементная модель рефлектора с присоединенной массой и подкрепляющими ребрами. Рефлектор закрепляется от перемещений в трех точках на канте.

Разработанная конечно элементная модель была использована для модального анализа и для определения параметров напряженно-деформированного состояния рефлектора. Расчет выполнялся для случая, когда присоединенная масса равна 3 кг. На рис. 12 приведены формы колебаний рассматриваемого рефлектора для двух вариантов размеров центрально тонкостенной шестигранной призмы.

Первые частоты колебаний рефлектора с радиальными ребрами равны 61.2 Гц и 64.3 Гц. Отметим, что соответствующие частоты конструкции без радиальных ребер принимали значения 55.1 Гц и 56.6 Гц. Таким образом, постановка дополнительных ребер приводит к определенному увеличению частоты колебаний.

На рис. 13 представлена картина деформирования рефлектора, нагруженного массовыми силами в двух

направлениях. Величина перегрузок по-прежнему равна 20 g.

Максимальные перемещения рефлектора с различными размерами шестигранной призмы равны 0.9 мм и 1.13 мм. Аналогичные величины в конструкции без радиальных ребер принимали значения 3.22 мм и 3.11 мм.

Постановка радиальных ребер позволила значительно уменьшить перемещения в конструкции рефлектора.

Была выполнена также оценка влияния использования дополнительных ребер на величины напряжений, возникающих в рефлекторе под действием массовых сил. На рис. 14 показана картина распределения напряжений для двух вариантов размеров центрально шестигранной призмы.

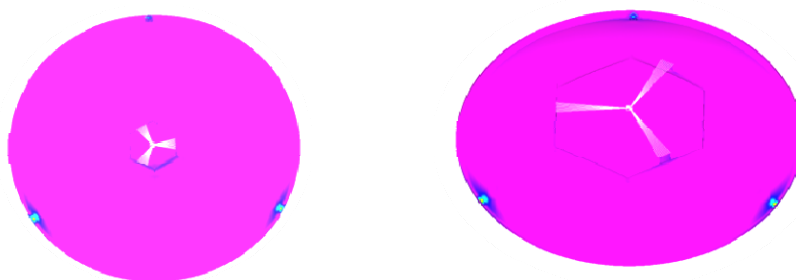


Рис. 10. Распределение напряжений в конструкции рефлектора с присоединенной массой

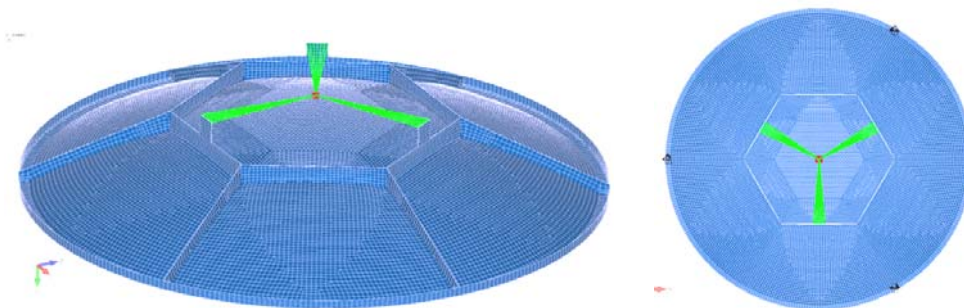


Рис. 11. Полная конечно-элементная модель рефлектора

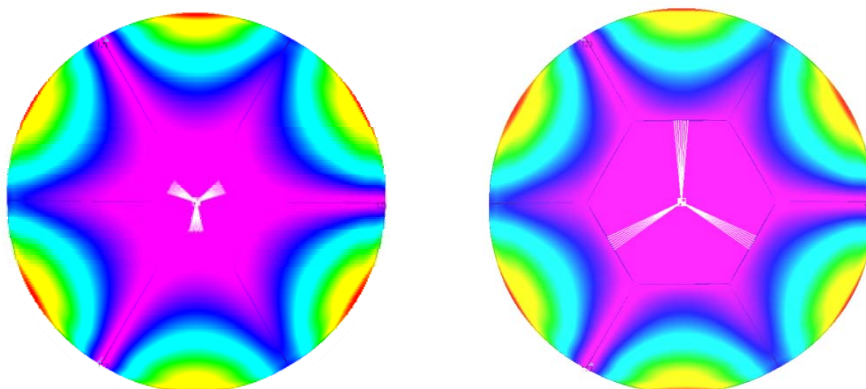


Рис. 12. Первые формы колебаний рефлектора с радиальными ребрами

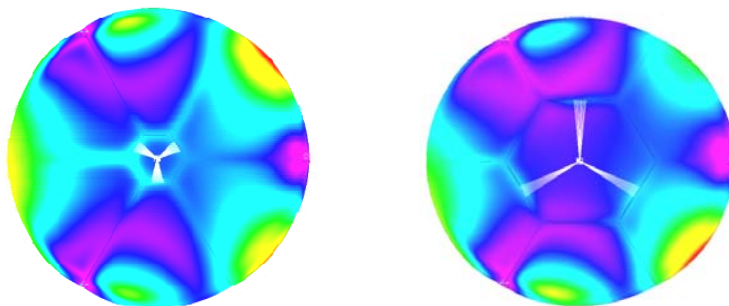


Рис. 13. Перемещения в рефлекторе с радиальными ребрами

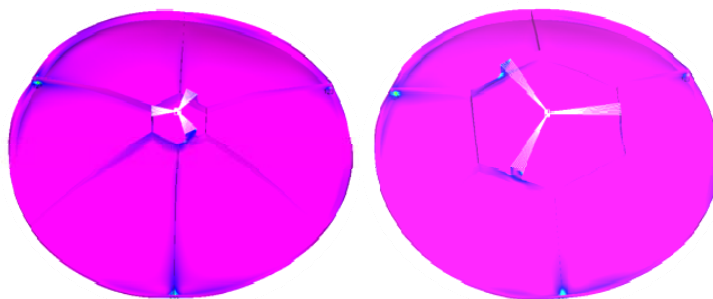


Рис. 14. Распределение напряжений в рефлекторе с радиальными ребрами

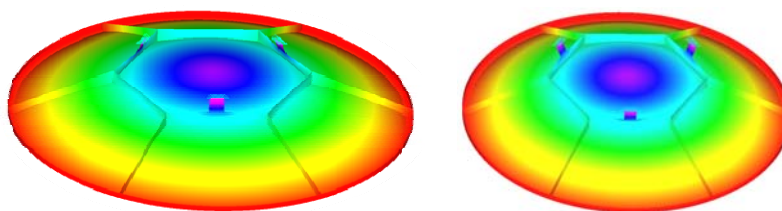


Рис. 15. Распределение перемещений в рефлекторе при температурах 150° и -150°

Максимальные напряжения, возникающие в конструкциях с разными по размерам шестигранными призмами соответственно равны 106.7 МПа и 103.8 МПа. Аналогичные напряжения, действующие в рефлекторе без радиальных ребер, принимали значения 368.7 МПа и 363.9 МПа. Таким образом, использование радиальных ребер позволяет значительно снизить уровень напряжений в окрестности точек зачековки.

В работе решена задача о деформировании композитного рефлектора с радиальными ребрами, испытывающего воздействие температуры. Кромки пластин, расположенных на гранях тонкостенной шестигранной призмы, закреплены от всех перемещений и углов поворота. Коэффициент линейного термического расширения принимался $1.95 \cdot 10^{-6}$ 1/град. При анализе рассматривались два варианта теплового воздействия. В первом варианте рефлектор был нагрет до температуры 150°. Распределение перемещений в этом случае показано на рис. 15.

Во втором варианте рефлектор охлаждался до температуры -150°. Отметим, что максимальные пе-

ремещения для двух вариантов теплового воздействия соответственно равны 0.185 мм и 0.243 мм.

Таким образом, в статье разработана методика создания конструкции параболического рефлектора с помощью конечно-элементного моделирования. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании антенн современных космических аппаратов.

Библиографические ссылки

1. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1988. 272 с.
2. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М. : ДМК Пресс, 2013. 784 с.

References

1. Vasiliev V. V. Mechanics of composite structures. Moscow, Mashinostroyeniye, 1988. 272 p.
2. Richkov S. P. Modeling of structures with Femap NX Nastran. Moscow, DMK Press, 2013. 784 p.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА В СИБГАУ*

А. В. Лопатин, С. И. Сенашов

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

Подводятся итоги исследований по механике деформируемого твердого тела (МДТТ) в СибГАУ за период с 2000 по 2013 гг. Все статьи условно разбиты на три группы: 1) аналитические исследования уравнений МДТТ; 2) численные методы решения задач МДТТ; 3) экспериментальные методы в МДТТ.

В первую группу попали, в основном, работы, посвященные аналитическому решению уравнений упругости и пластичности. Используются симметрии и законы сохранения, которые позволяют строить не только точные решения уравнений упругости и пластичности, но и решать краевые задачи для этих уравнений. Во втором разделе содержатся работы, которые посвящены теоретическому обоснованию численных расчетов, там же приведены модификации известных методов, которые приспособлены для решения конкретных задач, возникающих при моделировании элементов конструкций, в частности, космических аппаратов. В третий раздел включены работы, которые посвящены экспериментальному исследованию материалов, используемых при конструировании элементов космических аппаратов.

Ключевые слова: механика деформируемого твердого тела, аналитические и численные решения, экспериментальные методы.

INVESTIGATIONS ON THE DEFORMABLE SOLID BODY MECHANICS IN SIBSAU

A. V. Lopatin, S. I. Senashov

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

In this review article the authors summarize the results of the research on the mechanics of deformable solids in the Siberian State Aerospace University from the year 2000 to 2013. All articles are divided into three groups: 1) analytical studies of equations of mechanics of solids; 2) the numerical methods of solution of mechanics of solids; 3) the experimental methods in mechanics of solids.

The first group includes mainly the works devoted to the analytical solution of the equations of elasticity and plasticity. They used symmetries and conservation laws, which allow to build not only exact solutions of equations of elasticity and plasticity, but also to solve boundary value problems for the equations. The second group contains works devoted to theoretical basis of numerical calculations; there are modifications of known methods that are tailored to address specific problems arising in the modeling of structural elements, in particular, of spacecrafts. The third group includes works that are devoted to the experimental study of the materials used in the construction of elements of spacecrafts.

Keywords: mechanics of deformable solids, analytical, numerical solution, experimental methods.

Аналитическое исследование уравнений МДТТ.

В статьях [5–7; 15; 18; 21–23; 25; 27; 33; 41; 43–46; 48; 50; 55] ищутся симметрии и законы сохранения дифференциальных уравнений упругости и пластичности. Здесь под симметриями системы уравнений понимаются такие преобразования, зависящие от независимых переменных и их производных, которые оставляют инвариантными системы уравнений и все их дифференциальные следствия. Знание симметрий позволило не только глубже понять структуру дифференциальных уравнений, но и эффективно строить инвариантные решения, т. е. такие решения, которые симметриями переводятся сами в себя. Изучение и построение инвариантных решений показало, что все важные решения, которые используются в

практических расчетах для оценки прочности и допустимых нагрузок являются инвариантными. В работах [15; 18; 21] показано, что каждое такое инвариантное решение порождает целую серию точных решений, более того все не особые решения могут быть построены таким образом.

(Техника построения особых решений разработана уже почти 100 лет назад.)

В работах [5; 15; 18; 23; 25; 27; 38; 41; 43–45; 48; 55] на основе симметрий строятся точные решения уравнений упругости и пластичности. Предпочтение отдается таким решениям, которые имеют физический смысл и могут быть использованы для анализа технологических процессов и нагрузок в реальных конструкциях.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, шифр проекта 1.3720.2011, 7.5445.2011.

Очень важной является операция группового расчленения системы дифференциальных уравнений. Эта операция разбивает систему на две: автоморфную и разрешающую. Автоморфная система характеризуется тем, что все решения ее могут быть получены с помощью преобразований симметрий из любого решения этой же системы. На разрешающую систему группа симметрий действует тождественно, т. е. любое решение разрешающей системы переводится в себя. Построение разрешающих и автоморфных систем осуществлено для уравнений изотропной и анизотропной пластичности [48], для уравнений плоской теории пластичности [15; 43], а также для трехмерных уравнений пластичности, описывающих некоторые классы пластических течений [21].

В работе [48] методами группового анализа исследована система уравнений трансверсально-изотропной упругости. Показано, что эта система удовлетворяет условию Грассмана, а значит, может быть сведена к системе уравнений первого порядка. Данная система является разрешающей системой, относительно группы точечных преобразований, допускаемых уравнениями упругости. Это позволяет построить точное решение, которое представляет собой аналог волн Релея для трансверсально-изотропной упругости.

Использование законов сохранения для решения нелинейных дифференциальных уравнений пластичности началось после выхода работы [56]. Эта статья инициировала серию исследований посвященных аналитическому решению задач теории пластичности, упруго-пластичности и теории сыпучих сред [5; 7; 25; 53]. Особенностью этих и аналогичных работ является то, что в результате, с помощью квадратур, строится аналитическое решение краевой задачи, и нахождение значений напряжений сводится к интегрированию по криволинейному контуру.

Серия статей [1; 10; 22; 34; 51] посвящена исследованию форм нелинейных стержней и стержневых систем, состоящей из нескольких стержней находящихся в напряженно-деформированном состоянии. Постановка и первые решения этой задачи принадлежат еще Л. Эйлеру. В работах использованы эллиптически интегралы и специальные функции Якоби, благодаря этому построенное решение зависит от одного параметра – модуля эллиптической функции, значение которой определяется действующей нагрузкой. Такое представление решений позволяет описать форму изогнутой стержневой конструкции при любом числе точек перегиба.

В работах [39; 40] решена задача определения источника колебаний упругого стержня по дополнительной информации – значению прогиба в финальный момент времени. Доказана разрешимость начально – краевой задачи для уравнения, описывающего волну нагружения. Доказательство существования решения основывается на построенной последовательности Галеркина.

Численные методы решения задач МДТТ. В работе Лопатина А. В., Демина А. Н. [2] решена задача

об исследовании влияния структурной анизотропии на устойчивость композиционной цилиндрической оболочки при осевом сжатии. Получены зависимости, связывающие углы армирования и относительные толщины слоев с величинами критических усилий.

В статье Лопатина А. В., Макарова И. В., Рутковской М. А. [8] рассмотрена задача определения массовой энергоемкости маховика гиперболического профиля.

В работе Лопатина А. В., Макарова И. В., Шумковой Л. В. [9] выполнено оптимальное проектирование трехслойной балки при наличии ограничений, накладываемых на частоты колебаний.

В статье Лопатина А. В., Шумковой Л. В. [3] рассматривается задача о деформировании гибкой фотоэлементной подложки, прикрепленной в растянутом состоянии к жесткому каркасу солнечной батареи. Подложка находится под действием массовых сил, направленных перпендикулярно ее плоскости. Расчетной моделью подложки является ортотропная мембрана, нагруженная равномерным давлением и растягивающими усилиями в плоскости. Деформирование ортотропной мембраны описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, приближенное решение которых выполнено методом Галеркина. Продемонстрирована возможность использования полученных уравнений и формул для проектирования конструкции солнечной батареи.

В работе Лопатина А. В., Рутковской М. А. [13] выполнен модальный анализ тонкостенной спицы зонтичной антенны. Он позволяет оценить жесткость конструкции и при необходимости помочь в определении мест крепления к спице штанг, используемых при раскрытии антенны. Расчетной моделью спицы, учитывая ее значительное удлинение, является тонкостенный ортотропный стержень, один край которого жестко закреплен, а другой свободен. Это связано с тем, что после раскрытия антенны, спица жестко фиксируется в ступице. Уравнения, описывающие движение композитной спицы, учитывают деформации поперечного сдвига и инерцию поворота поперечного сечения. Задача определения частоты колебаний спицы сведена к вычислению безразмерного частотного параметра, величина которого зависит от удлинения спицы и угла армирования. Результаты расчета частотного параметра были использованы для определения оптимальных радиуса поперечного сечения и угла армирования спицы при наличии ограничений, накладываемых на частоты колебаний.

В статьях Лопатина А. В., Рутковской М. А. [14; 16] выполнен обзор современных трансформируемых космических антенн. Приведена систематизация конструкций антенн по различным признакам.

В статье Лопатина А. В., Авакумова Р. В. [26] исследуется устойчивость ортотропной пластины с двумя свободными краями, нагруженной изгибающим моментом в плоскости. Решение получено с помощью метода Леви и метода конечных разностей.

В работе Лопатина А. В. и Деева П. О. [30] решена задача определения основной частоты колебаний

трехслойной пластины со свободным краем, структура которой состоит из двух одинаковых композитных несущих слоев и ортотропного заполнителя. Для получения вариационных уравнений изгибных колебаний пластины был использован принцип Гамильтона. При этом потенциальная энергия изгиба и кинетическая энергия трехслойной пластины были определены с помощью сдвиговой теории слоистых. Решение уравнений движения было выполнено обобщенным методом Галеркина. Получена аналитическая формула, определяющая основную частоту колебаний трехслойной пластины. Проверка результатов вычисления частот с помощью этой формулы была выполнена методом конечных элементов. Проведенная верификация выявила хорошее совпадение значений частот, полученных двумя способами. Использование аналитической формулы для частоты колебаний было продемонстрировано в задаче проектирования трехслойной пластины со свободным краем.

В работе Лопатина А. В., Удальцова Р. А. [35] решена задача о симметричных колебаниях трехслойной пластины, структура которой состоит из двух одинаковых композитных несущих слоев и ортотропного заполнителя. С использованием вариационного принципа Гамильтона получено дифференциальное уравнение, описывающее движение трехслойной пластины. При выводе этого уравнения были использованы два предположения, касающиеся деформирования заполнителя. Согласно первому предположению в заполнителе отсутствуют тангенциальные перемещения. В соответствии со вторым предположением нормальные перемещения в заполнителе изменяются от прогиба несущего слоя до нуля по нелинейному закону. Были получены формулы, определяющие частоту симметричных колебаний трехслойной пластины, у которой края несущих слоев шарнирно закреплены. Показано, что частота колебаний трехслойной пластины может быть представлена в виде произведения частоты колебаний несущего слоя и частотного коэффициента, который учитывает динамическое поведение заполнителя. Приведены формулы, определяющие величину частотного коэффициента для трехслойных пластин с ортотропными и изотропными несущими слоями. С помощью метода конечных элементов была выполнена верификация разработанной модели симметричных колебаний трехслойной пластины. Из сравнения результатов вычислений следует, что полученные в работе формулы позволяют с высокой достоверностью определять частоты симметричных колебаний трехслойных пластин. Разработанная модель дает возможность находить частоты с точностью сопоставимой с точностью аналогичных расчетов, выполненных в пакетах COSMOS/M, ANSYS. При этом частотный анализ, выполненный на основе представленной модели, требует минимальных вычислительных ресурсов.

В статье Деева П. О. [42] решена задача определения основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины, в центральной точке которой отсутствует прогиб и углы поворота. Вариационное

уравнение движения получено с помощью принципа Гамильтона. Для решения задачи был использован обобщенный метод Галеркина. Аппроксимация прогиба пластины, у которой все четыре угла движутся в одну сторону, выполнена с помощью определенной комбинации балочных функций. Задача определения основной частоты колебаний сведена к вычислению безразмерного частотного параметра, величина которого зависит от упругих и геометрических характеристик пластины. Частотный параметр находится как минимальное собственное число матрицы третьего порядка. Выполнены расчеты основной частоты колебаний для различных трехслойных пластин, закрепленных в центральной точке. Полученные результаты были подтверждены соответствующим конечно-элементным анализом.

В статье Лопатина И. А. [52] с помощью обобщенного метода Галеркина решена задача определения основной частоты колебаний прямоугольной ортотропной пластины, которая закреплена от прогиба в угловых точках. Для аппроксимации прогиба пластины была использована комбинация тригонометрических функций. Показано, что рассматриваемая задача сводится к определению безразмерного частотного параметра, величина которого равна наименьшему собственному числу соответствующей однородной системе уравнений третьего порядка. В качестве примера определен частотный коэффициент для изотропной пластины. Выполнено сравнение с результатами, полученными численным методом. Это сравнение позволило сделать вывод о том, что представленные в статье формулы позволяют с высокой точностью и минимальными вычислительными затратами определять основные частоты колебаний пластин, закрепленных углах.

В работе Лопатина А. В. и др. [51] представлена новая геометрически-нелинейная модель трансформируемого обода большой космической антенны построенного с использованием гибких композитных элементов. Основным элементом обода – гибкая композитная полоса. Развернутый обод антенны состоит из двух кругов изогнутых углепластиковых полос и труб, соединяющих их. В свернутой конфигурации изогнутые полосы выправляются и запасают потенциальную энергию деформации. Открытие антенны на орбите осуществляется за счет высвобождения запасенной энергии. Сформулирована нелинейная краевая задача для изогнутого состояния и получены точные аналитические решения в эллиптических функциях и интегралах, описывающие изгиб полос. При моделировании использована геометрически-нелинейная модель, позволяющая получать точные аналитические решения. Полученное решение позволит определять оптимальную форму изогнутой криволинейной полосы и оценивать запасенную энергию.

В статье Лопатина И. А. [47] представлено решение задачи о выборе закона изменения поперечного сечения стержня, обеспечивающего восприятия максимальной сжимающей силы при заданном объеме материала. Осесимметричные пространственные

фермы, составленные из прямолинейных стержней, нашли широкое применение в качестве адаптеров полезной нагрузки. Расчет таких конструкций проводится в предположении, что стержни фермы соединены шарнирно. Основным видом разрушения стержня является потеря устойчивости при действии на него сжимающей силы. Стержни фермы в большинстве конструкций имеют постоянное по длине поперечное сечение. Вместе с тем использование в ферме стержней с переменным поперечным сечением позволяет создавать более эффективные конструкции. С использованием аналогичной модели в статье Лопатина А. В., Удальцова Р. А. [29] исследована симметричная потеря устойчивости композитной трехслойной пластины, нагруженной сжимающими усилиями.

В статьях Нестерова В. А. [31; 32; 36–38; 54] разрабатывается конечный элемент, учитывающий сдвиговую податливость композитных балок и пластин.

Экспериментальное исследование материалов, используемых при конструировании элементов космических аппаратов. В работе [11] представлены кривые усталости при мягком симметричном нагружении гладких образцов из сплавов Д16, которые достаточно хорошо совпадают с экспериментальными кривыми полученными авторами статьи. Приведено уравнение, которое можно использовать для прогнозирования конструктивных элементов. В работе [12] проанализированы свойства общей системы разрешающей системы уравнений плоской задачи упругости, написанной для среды армированной двумя семействами волокон, расположенных в направлениях произвольных изогональных траекторий. Предложенная методика позволяет решать краевые задачи для семейства равнонапряженных и нерастяжимых волокон с различными упругими свойствами. Расчеты проведены для случая, когда материал связующего алюминий, армирование проведено стальными волокнами. В статье [17] предложен подход к расчету пространственных шарнирно-стержневых систем с жесткими элементами типа переходных отсеков. Он заключается в сочетании принципа возможных перемещений с методом конечных элементов. Рассмотрены этапы от постановки краевой задачи и компьютерного моделирования до анализа напряженно – деформированного состояния конструкции. Анализируется вопрос прочности, исследуемой конструкции. С помощью методики проведен расчет некоторых пространственных ферм. В [19] рассмотрены основные типы предельных состояний для лопастей воздушных винтов самолетов. Выполнена расчетно-экспериментальная оценка остаточной прочности и ресурса лопастей при статическом и циклическом нагружении. Установлены критические и допускаемые размеры трещин, получены расчетные кривые усталости. Авторы заметили резкое увеличение коэффициентов напряжений и повышение скоростей развития усталостных трещин на определенной стадии циклического нагружения. Сделан вывод, что дефектоскопический в лопастях необходимо делать не только с учетом времени налета, но и по числу взлетов и посадок.

В [20] реализован методический подход к оценке ресурса деталей машин при ударно-циклическом нагружении. Он основывается на линейной гипотезе накопления усталостных повреждений и схематизации нестационарных нерегулярных процессов нагружения, получаемых вычислительным моделированием с учетом конструкционной формы деталей, кинематической и энергетической характеристикой машин.

В работе [57] описана конструкция измерительной головки и измерительного стенда для проведения испытаний металлических поверхностей. Результаты испытаний представлены в виде диаграммы «нагрузка-глубина вдавливания» для алюминиевых сплавов и легированных сталей. Представленное в статье конструкционное решение защищено патентом РФ.

Библиографические ссылки

1. Задачи нелинейного изгиба стержневых конструкций / Ю. В. Захаров, К. Г. Охоткин, В. В. Исакова, А. Д. Скоробогатов // Вестник СибГАУ. 2005. № 6. С. 45–51.
2. Лопатин А. В., Демин А. Н. Влияние структурной анизотропии на устойчивость композиционной цилиндрической оболочки при осевом сжатии // Вестник СибГАУ. 2005. № 6. С. 62–65.
3. Лопатин А. В., Шумкова Л. В. Нелинейное деформирование ортотропной мембраны натянутой на жесткий каркас // Вестник СибГАУ. 2005. № 6. С. 64–68.
4. Наговицин В.Н. Задача оптимизации сжатой цилиндрической оболочки с учетом ее надежности // Вестник СибГАУ. 2005. № 6. С. 74–77.
5. Жданов О. Н. Решение задачи Коши, описывающей одномерный поток гранулированного материала // Вестник СибГАУ. 2005. № 7. С. 5–7.
6. Гомонова О. В. Характеристики системы дифференциальных уравнений плоского напряженного состояния, соответствующие инвариантным решениям // Вестник СибГАУ. 2006. № 1 (8). С. 14–16.
7. Коюпченко И. Н., Сенатов С. И. Группа Ли-Беклунда и законы сохранения уравнений анизотропной идеальной пластической среды // Вестник СибГАУ. 2006. № 3 (10). С. 17–21.
8. Лопатин А. В., Макаров И. В., Рутковская М. А. Определение массовой энергоемкости маховика гиперболического профиля // Вестник СибГАУ. 2006. № 3 (10). С. 26–31.
9. Лопатин А. В., Макаров И. В., Шумкова Л. В. Оптимальное проектирование трехслойной балки при заданных частотах поперечных колебаний // Вестник СибГАУ. 2006. № 3 (10). С. 31–36.
10. Захаров Ю. В., Охоткин К. Г., Скоробогатов А. Д. Нелинейный изгиб консоли распределенной нагрузкой // Вестник СибГАУ. 2006. № 4 (11). С. 20–24.
11. Никушкин Н. В., Кацура А. В., Васильев Р. П. Критерий усталостного разрушения металлов при мало-многоцикловом нагружении // Вестник СибГАУ. 2006. № 6 (13). С. 34–38.
12. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Моделирование деформирования плоских авиационных кон-

струкций армированных двумя семействами криволинейных волокон // Вестник СибГАУ. 2006. № 6 (13). С. 38–44.

13. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Выбор упругих и геометрических параметров токоотводящей антенны // Вестник СибГАУ. 2007. №1(14). С. 3–8.

14. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (ч. 1) // Вестник СибГАУ. 2007. № 2 (15). С. 51–57.

15. Сенашов С. И., Гомонова О. В. Эволюция характеристик решений двумерных задач теории идеальной пластичности // Вестник СибГАУ. № 3 (16). С. 51–55.

16. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (часть 2) // Вестник СибГАУ. 2007. № 3 (16). С. 77–81.

17. Сабиров Р. А. К расчету напряженно-деформированного состояния переходных ферменных отсеков летательных аппаратов // Вестник СибГАУ. 2007. № 4 (17). С. 100–105.

18. Яхно Л. В. Преобразование решения Надаи в решение Прандтля для системы идеальной двумерной пластичности // Вестник СибГАУ. 2008. № 4 (21). С. 65–67.

19. Оценка предельных состояний лопастей воздушных винтов самолетов / Н. А. Махутов, В. В. Москвичев, А. С. Серегин, М. П. Степнов // Вестник СибГАУ. 2009. № 1 (22). Ч. 1. С. 92–97.

20. Доронин С. В., Косолапов Д. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния и оценка ресурса при ударно-циклическом нагружении // Вестник СибГАУ. 2009. № 1 (22). Ч. 2. С. 23–27.

21. Сенашов С. И., Черепанова О. Н. Гомотопия решений уравнения минимальных поверхностей // Вестник СибГАУ. 2009. № 2 (23). С. 84–85.

22. Захаров Ю. В., Исакова В. В., Охоткин К. Г. Аналогия перемагничивания обменно-связной магнитной структуры и изгиба упругого стержня со сжатием // Вестник СибГАУ. 2009. № 2 (23). С. 122–125.

23. Сенашов С. И., Гомонова О. В. Новые точные решения, описывающие двумерные поля скоростей для решения Прандтля // Вестник СибГАУ. 2009. № 4 (25). С. 18–21.

24. Кузоватова О. И., Садовский В. М. Численное исследование задачи о продавливании вязкой сыпучей среды // Вестник СибГАУ. 2009. № 4 (25). С. 21–26.

25. Сенашов С. И., Яхно А. Н. Решение задачи Коши для гиперболической системы однородных двумерных квазилинейных уравнений // Вестник СибГАУ. 2009. № 4 (25). С. 26–28.

26. Лопатин А. В., Авакумов Р. В. Устойчивость ортотропной пластины с двумя свободными краями, нагруженной изгибающим моментом в плоскости // Вестник СибГАУ. 2009. № 4 (25). С. 28–33.

27. Gomonova O. V., Senashov S. I. New exact solutions which describe 2-dimensional velocity field for

Prandtl's solution // Вестник СибГАУ. 2009. № 5 (26). С. 43–45.

28. Lopatin A. V., Avakumov R. V. Buckling of orthotropic plates with the two free edges loaded for the pure in-plane bending moment // Вестник СибГАУ. 2009. № 5 (26). С. 21–25.

29. Лопатин А. В., Удальцов Р. А. Симметричная потеря устойчивости композитной трехслойной пластины // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 23–28.

30. Лопатин А. В., Деев П. О. Определение основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины со свободным краем // Вестник СибГАУ. 2010. № 3 (29). С. 64–71.

31. Нестеров В. А. Матрица жесткости конечного элемента пространственной балки с низкой трансверсальной сдвиговой жесткостью // Вестник СибГАУ. 2010. № 3 (29). С. 71–76.

32. Нестеров В. А., Лопатин А. В. Вывод разрешающих уравнений равновесия пластины с низкой трансверсальной сдвиговой жесткостью // Вестник СибГАУ. 2010. № 3 (29). С. 81–86.

33. Сенашов С. И., Бурмак В. И. Точное решение уравнений пластичности плоского напряженного состояния // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 10–11.

34. Власов А. Ю., Захаров Ю. В., Филенкова Н. В. Изгиб упругой консоли в поле центробежных сил: пороговые значения нагрузок // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 15–20.

35. Лопатин А. В., Удальцов Р. А. Симметричные колебания трехслойной пластины // Вестник СибГАУ. 2010. № 5(31). С. 221–227.

36. Нестеров В. А. Поперечные колебания пластины, податливой при трансверсальном сдвиге // Вестник СибГАУ. 2010. № 5 (31). С. 236–242.

37. Нестеров В. А., Лопатин А. В. Вывод выражения энергии деформации оболочки в геометрически нелинейной постановке // Вестник СибГАУ. 2010. № 5 (31). С. 242–246.

38. Нестеров В. А. Конечно элементный расчет трехслойной балки // Вестник СибГАУ. 2011. № 2 (35). С. 48–54.

39. Frost M. B. Solvability of an initial-boundary problem for a loaded wave equation // Вестник СибГАУ. 2011. № 2 (35). С. 76–80.

40. Frost M. B. Determining the source of transverse oscillations of the elastic rod // Вестник СибГАУ. 2011. № 3 (36). С. 8–11.

41. Сенашов С. И. Законы сохранения в задаче о продольной плоской волне нагрузки в упругопластическом стержне // Вестник СибГАУ. 2011. № 3 (36). С. 85–88.

42. Деев П. О. Определение основной частоты колебаний прямоугольной трехслойной пластины закрепленной в центральной точке // Вестник СибГАУ. 2011. № 4 (37). С. 25–30.

43. Сенашов С. И., Гомонова О. В., Михеев А. Е. О построении полей скоростей для неособых полей напряжений // Вестник СибГАУ. 2011. № 5 (38). С. 88–90.

44. Некоторые точные решения уравнений анизотропной теории пластичности / С. И. Сенашов, Е. В. Филюшина, А. М. Попов, И. В. Ковалев // Вестник СибГАУ. 2011. № 3 (36). С. 90–92.
45. Сенашов С. И., Филюшина Е. В., Попов Е. А. Преобразование точных решений уравнений пластичности высшими симметриями // Вестник СибГАУ. 2011. № 3 (36). С. 92–95.
46. Бурмак В. И. Оптимальные системы подалгебр и инвариантные решения уравнений плоского напряженного состояния // Вестник СибГАУ. 2012. № 1 (41). С. 10–15.
47. Лопатин И. А. Решение вариационной задачи по выбору оптимальной формы сжатого стержня // Вестник СибГАУ. 2012. № 1 (41). С. 28–31.
48. Аннин Б. Д., Чиркунов Ю. А., Бельмеев Н. Ф. Групповое расслоение уравнений трансверсально-изотропной упругости // Вестник СибГАУ. 2012. № 3 (43). С. 4–7.
49. Нестеров В. А. Конечно-элементный анализ устойчивости балки, податливой при трансверсальном сдвиге // Вестник СибГАУ. 2012. № 3(43). С. 56–62.
50. Сенашов С. И., Филюшина Е. В. О новых решениях уравнений пластичности, полученных с помощью высших симметрий // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 53–56.
51. Геометрически нелинейная модель трансформируемого обода большой космической антенны с гибкими композитными элементами / А. В. Лопатин, Ю. В. Захаров, К. Г. Охоткин, В. В. Вильянен, А. В. Пашковский // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 75–80.
52. Лопатин И. А. Определение основной частоты ортотропной пластины, закрепленной в углах // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 80–84.
53. Сенашов С. И. О системах дифференциальных уравнений с двумя характеристиками // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 104–106.
54. Нестеров В. А. Модальный конечно-элементный анализ балок, податливых при трансверсальном сдвиге // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 68–74.
55. Сенашов С. И., Филюшина Е. В. Линии тока для решения Прандтля // Вестник СибГАУ. 2013. № 1(47). С. 79–82.
56. Сенашов С. И. Законы сохранения и точное решение задачи Коши для уравнений идеальной пластичности // ДАН. 1995. Т. 345, № 5. С. 619–620.
57. Автономов Н. Н., Пучнин М. С. Регистрация диаграммы вдавливания шарового индентора с использованием измерительной головки // Вестник СибГАУ. 2011. № 5 (38). С. 124–127.
4. Nagovicin V. N. *Vestnik SibGAU*, 2005, № 6, p. 74–77.
5. Zhdanov O. N. *Vestnik SibGAU*, 2005, № 7, p. 5–7.
6. Gomonova O. V. *Vestnik SibGAU*, 2006, №1(8), p. 14–16.
7. Kojupchenko I. N., Senashov S. I. *Vestnik SibGAU*, 2006, № 3 (10), p. 17–21.
8. Lopatin A. V., Makarov I. V., Rutkovskaja M. A. *Vestnik SibGAU*, 2006, № 3 (10), p. 26–31.
9. Lopatin A. V., Makarov I. V., Shumkova L. V. *Vestnik SibGAU*, 2006, № 3 (10), p. 31–36.
10. Zaharov Ju. V., Ohotkin K. G., Skorobogatov A. D. *Vestnik SibGAU*, 2006, № 4 (11), p. 20–24.
11. Nikushkin N. V., Kacura A. V., Vasil'ev R. P. *Vestnik SibGAU*, 2006, № 6 (13), p. 34–38.
12. Nemirovskij Ju. V., Fedorova N. A. *Vestnik SibGAU*, 2006, № 6 (13), p. 38–44.
13. Lopatin A. V., Rutkovskaja M. A. *Vestnik SibGAU*, 2007, № 1 (14), p. 3–8.
14. Lopatin A. V., Rutkovskaja M. A. *Vestnik SibGAU*, 2007, № 2 (15), p. 51–57.
15. Senashov S. I., Gomonova O. V. *Vestnik SibGAU*, № 3 (16), p. 51–55.
16. Lopatin A. V., Rutkovskaja M. A. *Vestnik SibGAU*, 2007, № 3 (16), p. 77–81.
17. Sabirov R. A. *Vestnik SibGAU*, 2007, № 4 (17), p. 100–105.
18. Jahno L. V. *Vestnik SibGAU*, 2008, № 4 (21), p. 65–67.
19. Mahutov N. A., Moskvichev V. V., Seregin A. S., Stepnov M. P. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 1 (22), ch. 1, p. 92–97.
20. Doronin S. V., Kosolapov D. V. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 1 (22), ch. 2, p. 23–27.
21. Senashov S. I., Cherepanova O. N. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 2 (23), p. 84–85.
22. Zaharov Ju. V., Isakova V. V., Ohotkin K. G. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 2 (23), p. 122–125.
23. Senashov S. I., Gomonova O. V. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 4 (25), p. 18–21.
24. Kuzovatova O. I., Sadovskij V. M. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 4 (25), p. 21–26.
25. Senashov S. I., Jahno A. N. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 4 (25), p. 26–28.
26. Lopatin A. V., Avakumov R. V. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 4 (25), p. 28–33.
27. Gomonova O. V., Senashov S. I. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 5 (26), p. 43–45.
28. Lopatin A. V., Avakumov R. V. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 5 (26), p. 21–25.
29. Lopatin A. V., Udalcov R. A. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 2 (28), p. 23–28.
30. Lopatin A. V., Deev P. O. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 3 (29), p. 64–71.
31. Nesterov V. A. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 3 (29), p. 71–76.
32. Nesterov V. A., Lopatin A. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 3 (29), p. 81–86.
33. Senashov S. I., Burmak V. I. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 4 (30), p. 10–11.

References

1. Zaharov Ju. V., Ohotkin K. G., Isakova V. V., Skorobogatov A. D. *Vestnik SibGAU*, 2005, № 6, p. 45–51.
2. Lopatin A. V., Demin A. N. *Vestnik SibGAU*, 2005, № 6, p. 62–65.
3. Lopatin A. V., Shumkova L. V. *Vestnik SibGAU*, 2005, № 6, p. 64–68.

34. Vlasov A. Ju., Zaharov Ju. V., Filenkova N. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 4 (30), p. 15–20.
35. Lopatin A. V., Udalcov R. A. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 5 (31), p. 221–227.
36. Nesterov V. A. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 5 (31), p. 236–242.
37. Nesterov V. A., Lopatin A. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 5 (31), p. 242–246.
38. Nesterov V. A. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 2 (35), p. 48–54.
39. Frost M. B. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 2 (35), p. 76–80.
40. Frost M. B. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 3 (36), p. 8–11.
41. Senashov S. I. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 3 (36), p. 85–88.
42. Deev P. O. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 4 (37), p. 25–30.
43. Senashov S. I., Gomonoova O. V., Miheev A. E. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 5 (38), p. 88–90.
44. Senashov S. I., Filjushina E. V., Popov A. M., Kovalev I. V. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 3 (36), p. 90–92.
45. Senashov S. I., Filjushina E. V., Popov E. A. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 3 (36), p. 92–95.
46. Burmak V. I. // *Vestnik SibGAU*, 2012, № 1 (41), p. 10–15.
47. Lopatin I. A. // *Vestnik SibGAU*, 2012, № 1 (41), p. 28–31.
48. Annin B. D., Chirkunov Ju. A., Belmecev N. F. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 3 (43), p. 4–7.
49. Nesterov V. A. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 3 (43), p. 56–62.
50. Senashov S. I., Filjushina E. V. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 4 (44), p. 53–56.
51. Lopatin A. V., Zaharov Ju. V., Ohotkin K. G., Viljanen V. V., Pashkovskij A. V. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 5 (45), p. 75–80.
52. Lopatin I. A. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 5 (45), p. 80–84.
53. Senashov S. I. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 5 (45), p. 104–106.
54. Nesterov V. A. *Vestnik SibGAU*, 2013, № 1 (47), p. 68–74.
55. Senashov S. I., Filjushina E. V. *Vestnik SibGAU*, 2013, № 1 (47), p. 79–82.
56. Senashov S. I. *DAN*, 1995, 345 (5), p. 619–620.
57. Avtonomov N. N., Puchnin M. S. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 5 (38), p. 124–127.

© Лопатин А. В., Сенашов С. И., 2013

УДК 62.501

ТЕОРИЯ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ. УПРАВЛЕНИЕ – II

А. В. Медведев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru

Формулируются некоторые новые задачи управления, возникшие на основе анализа реально протекающих процессов. Обсуждается необходимость анализа оптимальных, или близких к ним, параметрических алгоритмов управления с целью их исследования на предмет «грубости» ранее высказанных гипотез, их соответствия реальности или полученных ранее оценок соответствующих параметров моделей и регуляторов. Предлагается путь управления сложными дискретно-непрерывными процессами в диалоговом режиме на основе изменяющихся сцен в трехмерном пространстве, характеризующих поведение управляемого процесса в многомерном пространстве. Рассматриваются некоторые алгоритмы управления и приводятся результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: дискретно-непрерывный процесс, прогноз, диалоговая система, дуальное управление, непараметрические алгоритмы управления, адаптивное управление.

THEORY OF NONPARAMETRIC SYSTEMS. CONTROL – II

A. V. Medvedev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: Saor_medvedev@sibsau.ru

The author formulates some new control problems, arising on the basis of the analysis of real processes and discusses the necessity of the optimal, or close to it, analysis, parametric algorithms of control with the purpose of their

investigation with respect to the «ruffness» of the previously formulated hypotheses, their conformity to the reality or earlier received investigations of the relevant parameters of models and controllers. A way of the complex discrete-continuous processes control in dialog box mode on the basis of the changing scenes in three-dimensional space, describing the behaviour of a controlled process in the multidimensional space is proposed. Some control algorithms are discussed and the computational results of experiments are presented.

Keywords: discrete and continuous process, forecast, dialogue system, dual control, nonparametric control algorithms, adaptive control.

Теория – в виду практики.
Девиз конгрессов IFAC

Сегодня всему наступает пора,
Что бредом казалось вчера.
Э. Верхарн

Традиции теории управления могут быть объединены в два больших направления. Первое из них состоит в выборе параметрической структуры модели исследуемого процесса и синтеза на его основе параметрической же структуры управляющего устройства. Исторически этот путь был пройден от теории аналитического конструирования регуляторов до теории оптимальных систем управления: детерминированных, стохастических, адаптивных и обучающихся. Второе направление составляют многочисленные задачи анализа систем управления, когда структура управляющего устройства каким-то образом найдена или предложена. Типичными являются в последнем случае законы регулирования П, ПИ, ПИД и др. Основная задача этого направления состоит в обеспечении устойчивости замкнутых схем и заданного качества регулирования.

Ранее [1] уже обращалось внимание на формулировку задач управления при различных уровнях априорной информации, различной дискретности измеряемых переменных, сложности процесса и др. Конечно же, эти факторы, безусловно, влияют на окончательную формулировку задачи управления. Следует обратить внимание на то, что теория оптимальных систем управления по существу является теорией оптимального управления принятыми моделями управляемых процессов, которые, конечно же, в большей или меньшей степени отличаются от реальных. Отсюда, синтезированные алгоритмы оптимального управления отнюдь таковыми не являются по отношению к реальным процессам. Известны случаи, когда на практике оптимальные алгоритмы управления вообще оказывались неработоспособными. На этом пути возникает необходимость исследования новых задач, возникающих при традиционном взгляде на построение систем управления дискретно-непрерывными процессами. Ниже мы специально остановимся на формулировке этих задач.

Исходя из того, что теория оптимального управления и, соответственно, алгоритмы оптимального управления следует считать оптимальными по отношению к принятым моделям, которые, конечно же, в той или иной степени отличаются от реальности. В этой связи возникает крайне важное направление исследований, связанное с компьютерным анализом

оптимальных алгоритмов управления процессами, отличающимися от принятых на стадии синтеза оптимальных алгоритмов. Иными словами, такое исследование направлено на решение вопроса – как будут функционировать системы оптимального управления, если реально протекающий процесс отличается в большей или меньшей мере от того, который был положен в основу синтеза алгоритма оптимального управления.

Если же управляемый процесс оказывается слишком сложным, зависящим от большого числа входных и выходных переменных, контролируемых в различные интервалы времени, а в ряде случаев просто неконтролируемых, то может быть предложена иная диалоговая система управления. Она может представлять собой «движущийся» сценарий в трехмерных изменяющихся пространствах, характеризующих поведение процесса в многомерном пространстве.

Параметрическое дуальное управление. Ранее была изложена формулировка задачи дуального управления в постановке А. А. Фельдбаума [2]. Приведем систему параметрического дуального управления в постановке Я. З. Цыпкина [3]. Как и ранее, обозначим входную переменную объекта $u(t)$, а выходную – $x(t)$. В этом случае критерий оптимальности в задаче идентификации может быть определен в виде:

$$J_H(c) = M \{W_H(x[t] - F(x[t-1], u[t-1])c)\}. \quad (1)$$

Критерий оптимальности управляющего устройства можно записать в развернутой форме:

$$J_Y(b, c) = M \{W_Y(x^*[t] - F(x[t-1], \Psi(x[t-1])b)c)\}. \quad (2)$$

где $x^*[t]$ – задающее воздействие; W_H – критерий идентификации, сформированный на основании имеющейся априорной информации; W_Y – критерий управления, сформированный на основании имеющейся априорной информации; Ψ – заданный закон управления.

Оценка параметров $c[t]$, $b[t]$ осуществляется на основании метода стохастических аппроксимаций, в основу которого положены рекуррентные вероятностные процедуры оценки параметров в процессе функционирования замкнутой схемы, подробно изложенные в [3].

Непараметрическая система дуального управления. В условиях непараметрической неопределенности предполагается, что априорной информации недостаточно для определения параметрической модели процесса. Тем не менее, предполагаются известными некоторые качественные свойства, характеризующие поведение объекта. Например, объект обладает взаимно однозначной или неоднозначной характеристикой процесса для безынерционных систем, является линейным или указан тип нелинейности для динамических систем и др. Рассмотрим схему, представленную на рис. 1.

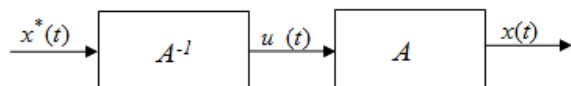


Рис. 1

Из вышеприведенной схемы видно, что

$$x(t) = A < u(t) >, \quad u(t) = A^{-1} < x(t) = x^*(t) >, \quad (3)$$

где A – неизвестный линейный оператор процесса; A^{-1} – оператор, обратный A . Из (3), с учетом, что $AA^{-1} = I$ – единичный оператор, можно получить

$$x(t) = AA^{-1} < x(t) = x^*(t) > = x^*(t). \quad (4)$$

Таким образом, вид идеального регулятора ($\square$ -регулятор) может быть представлен в форме (3). Используя уравнение (4), можно, задавая желаемую траекторию $x^*(t)$, получить идеальное значение управления $u^*(t)$. Однако, ключевая проблема на этом пути состоит в том, что в большинстве случаев построить такую схему невозможно, тем более, что оператор A – неизвестен.

Схема, показанная на рис. 1 требует пояснения. С математической точки зрения речь идет о преобразовании (отображении) $u \in U$ в $x \in X$, где U и X – линейные векторные пространства, т. е. $x = Au$. Представление $x = AA^{-1}x$ означает преобразование x в самого себя, т. е. U и X изоморфны. В реальности дело обстоит несколько иначе. Как справедливо заметил Н. Виннер: «Мы, математики, нуждаемся лишь в таких недорогих материалах, как бумага, и, быть может, типографская краска...». На самом деле нам приходится иметь дело с реальным объектом (турбина, реактор, плавильная печь и т. п.), а точнее с процессами, которые протекают в этих объектах, а не с оператором. В этой связи, если A для нас объект, то A^{-1} возможно назвать антиобъектом. Тогда можно сказать, что рис. 1 иллюстрирует «включение» на входе объекта антиобъекта, т. е. того, что в теории управления называют регулятором или управляющим устройством.

Уместно вспомнить, что приставка *анти* уже встречалась в науке ранее. У Н. А. Власова [4] мы встречаем: «Открытие античастиц – одно из крупнейших открытий физики этого столетия. Оно, в сущности, нашло вторую половину мира...».

Возможно, некоторое отношение к обсуждаемой нами проблеме управления, имеет высказанная Г. Вейлем [5] идея симметрии, зеркальной симметрии. Может быть не случайно лекции, посвященные этой проблеме, прочитанные в Институте высших исследований Принстонского университета Г. Вейль назвал «моей лебединой песней». И далее: «Красота тесно связана с симметрией... ее синоним гармония...».

Общая схема непараметрического дуального управления представлена ниже на рис. 2.

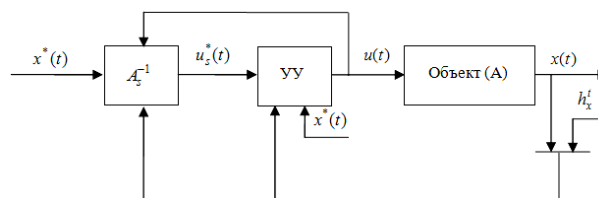


Рис. 2

Здесь (рис. 2) в результате функционирования замкнутого контура управления происходит уточнение оценки обратного оператора объекта.

Пусть линейный динамический процесс описывается разностным уравнением вида:

$$x[t] = \sum_{m=1}^l a_m x[t-m] + a_0 u[t], \quad (5)$$

где $a_0, a_m, m = \overline{1, l}$ – коэффициенты модели. Поступим, в связи с вышеизложенным, несколько «необычным образом». Перепишем уравнение (5) относительно $u[t]$:

$$u[t] = a_0^{-1} \left(x[t] - \sum_{m=1}^l a_m x[t-m] \right). \quad (6)$$

В этом случае выражение (6) играет роль обратного оператора по отношению к оператору A объекта.

Вычислительный эксперимент. Для иллюстрации работы «включенного» обратного оператора на входе объекта (рис. 1) приведем следующий пример. При описании объекта была принята существенно нелинейная характеристика (рис. 3). По результатам измерения «входа-выхода» процесса была получена выборка $(u_i, x_i, i = \overline{1, 100})$. Измерение выходной переменной объекта осуществлялось с 5-ти процентной аддитивной помехой. Далее, в соответствии с (4) находилось управляющее воздействие при изменяющихся значениях $x^*(t)$ и это управление подавалось на вход объекта, который реагировал на входное управление $u(t)$ соответствующими значениями выхода $x(t)$. Результаты эти расчетов иллюстрируются на рис. 4.

На вышеприведенных рисунках проиллюстрирован факт включения приближенного обратного оператора на входе объекта и в итоге оказывается, что $x_t \approx x_t^*$ (4).

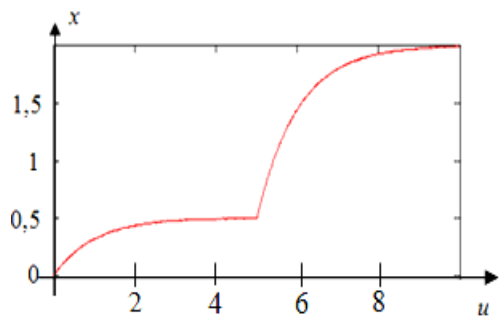


Рис. 3

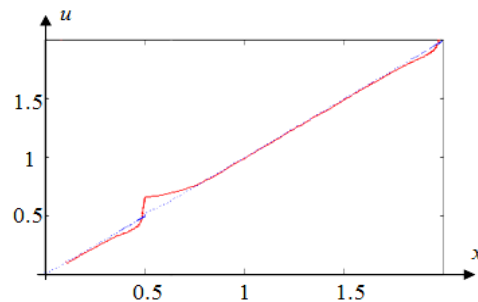


Рис. 4

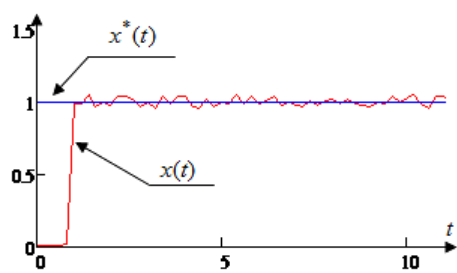


Рис. 5

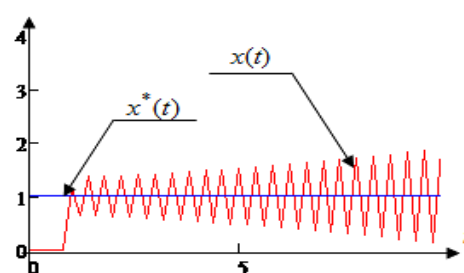


Рис. 6

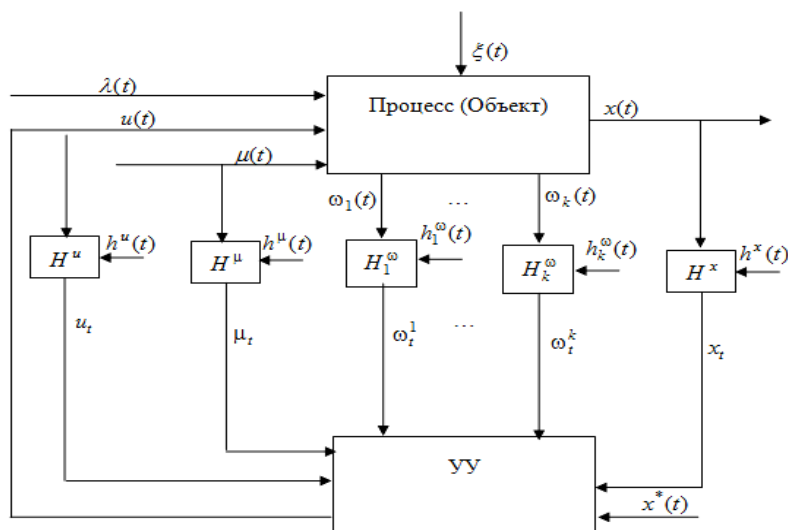


Рис. 7

Был взят объект, описываемый разностным уравнением третьего порядка, который был разрешен относительно управляющего воздействия, которое составляло содержание регулятора. В случае, если коэффициенты уравнения, описывающего объект, и коэффициенты модели совпадают, то естественно ожидать, что выход объекта, в соответствии с рис. 2, будут совпадать. Мы не будем иллюстрировать этот случай. В случае воздействия помех в канале связи переход объекта из одного состояния в другое иллюстрируется рис. 6.

При не совпадающих значениях коэффициентов естественно ожидать, что при использовании разомкнутой системы управления процесс будет расходиться, что и иллюстрирует рис. 6. В последнем случае

необходимо, во-первых, уточнять значения коэффициентов, а во-вторых, использовать обратную связь, то есть возвращаемся к схеме рис. 2.

Рассмотрим достаточно детально схему локальной системы, представленную на рис. 7, где A – неизвестный оператор объекта; УУ – устройство управления; $x(t)$ – выходная переменная процесса; $u(t)$ – управляющее воздействие; $\mu(t)$ – входная контролируемая, но неуправляемая переменная процесса; $\omega(t)$ – переменная, характеризующая промежуточное состояние процесса, дающая дополнительную информацию о протекании процесса. Входная переменная $\lambda(t)$ не поддается контролю, $\xi(t)$ – векторное слу-

чайное воздействие, t – непрерывное время, H^μ , H^u , H^x , H^ω – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, устройства для измерения наблюдаемых переменных, μ_i , u_i , x_i , ω_i – означает наблюдение $\mu(t)$, $u(t)$, $x(t)$, $\omega(t)$ в дискретное время t . Контроль переменных (x, u, μ, ω) осуществляется через некоторый интервал времени, т. е. x_i , u_i , μ_i , ω_i , $i = \overline{1, S}$ – выборка измерений переменных процесса $(x_1, u_1, \mu_1, \omega_1)$, $(x_2, u_2, \mu_2, \omega_2)$, ..., $(x_s, u_s, \mu_s, \omega_s)$, ..., S – объем выборки, $h^\mu(t)$, $h^u(t)$, $h^x(t)$, $h^\omega(t)$ со значком сверху – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса.

В этом случае выходные переменные, как и ранее, зависят от входных и $\omega(t)$ (дополнительная информация), то есть следующим образом:

$$x(t) = A(u(t), \mu(t), \omega(t), \lambda(t), \xi(t), t). \quad (7)$$

Обучающая выборка состоит из элементов «входных-выходных» переменных, доступных для измерений, и может быть представлена в виде $\{x_i, u_i, \mu_i\}$, $i = \overline{1, S}$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $u = (u_1, u_2, \dots, u_k)$, $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$.

Безусловно, управляемый процесс следует отнести к категории сложных, находящихся под воздействием неуправляемых переменных. В частности, на рис. 7 – это вектор $\lambda(t)$. Отсюда, естественно считать, что процесс протекает в некоторой оболочке типа «облако» в многомерном пространстве «входных-выходных» переменных. Для того, чтобы визуализировать, иными словами, обеспечить «видение» управляемого процесса в пространстве «входных-выходных» переменных предлагается использование постоянно развивающегося во времени сценария, характеризующего поведение изменяющегося во времени процесса, иллюстрируемого в трехмерном пространстве изменяющихся координат, определяемых вектором «входных-выходных» переменных. Область нормального протекания исследуемого процесса показана на нижеследующем рисунке в виде точек, а текущее состояние процесса, оцениваемое ЛПП (оператор, диспетчер) – жирной точкой. В компьютерном диалоге возможно эту ситуацию реализовать в варианте «компьютерной игры», доступной для визуализации состояния процесса в многомерном пространстве. Естественно считать, что в случае, если состояние процесса принадлежит соответствующему облаку, то процесс протекает нормально, в случае, если он на границе или вне, то требуется вмешательство ЛПП в ход процесса. Таким образом, управление подобным сложным процессом может быть реализовано в диалоговом режиме. Ясно, что в этом случае возникают некоторые новые задачи, которые будут изложены ниже.

Пусть управляемый процесс следует отнести к категории сложных, находящихся под воздействием векторных входных переменных. Отсюда, естествен-

но считать, что процесс протекает в некоторой оболочке типа «облако» в многомерном пространстве «входных-выходных» переменных. Для того, чтобы визуализировать, иными словами, обеспечить «видение» управляемого процесса в пространстве «входных-выходных» переменных предлагается использование постоянно развивающегося во времени сценария, характеризующего поведение изменяющегося во времени процесса, иллюстрируемого в трехмерном пространстве изменяющихся координат, определяемых вектором «входных-выходных» переменных. Область нормального протекания исследуемого процесса показана на нижеследующем рисунке в виде точек, а текущее состояние процесса, оцениваемое ЛПП (оператор, диспетчер) – жирной точкой. В компьютерном диалоге возможно эту ситуацию реализовать в варианте «компьютерной игры», доступной для визуализации состояния процесса в многомерном пространстве. Естественно считать, что в случае, если состояние процесса принадлежит соответствующему облаку, то процесс протекает нормально, в случае, если он на границе или вне, то требуется вмешательство ЛПП в ход процесса. Таким образом, управление подобным сложным процессом может быть реализовано в диалоговом режиме. Ясно, что в этом случае возникают некоторые новые задачи, которые будут изложены ниже. Итак, предположим, что на вход объекта поступает управляющая переменная $u(t) \in R^m$ и неуправляемая, но контролируемая переменная $\mu(t) \in R^k$. Выход объекта, как и ранее, обозначим $x(t) \in R^n$. В процессе измерения «входных-выходных» переменных объекта может быть сформирована обучающая выборка $\{u_i, \mu_i, x_i, i = \overline{1, S}\}$. Поскольку мы не можем визуализировать эту обучающую выборку в многомерном пространстве, то воспользуемся следующим сценарием.

Введем трехмерные пространства, координаты которых представляют собой компоненты u , μ и x . Чередование этих компонент показано на нижеследующих рисунках. Точками показаны элементы обучающей выборки $\{u_i, \mu_i, x_i, i = \overline{1, S}\}$. Жирная точка иллюстрирует положение текущего состояния управляемого процесса. Суть состоит в следующем: на экране монитора с некоторой заданной скоростью сцены сменяют друг друга (рис. 8, а, затем рис. 8, б и т. д.). При этом мы можем наблюдать, какое положение в многомерном пространстве принимает текущее состояние процесса (жирная точка) по отношению к ранее наблюдаемым «входным-выходным» переменным объекта. Из этого исследователь может сделать вывод о характере течения процесса. Если значения выходной переменной x (жирная точка) расположены внутри элементов обучающей выборки, то ход процесса можно считать удовлетворительным. Если значение x приближается к границе (находится на границе, либо за ее пределами), то необходимо вмешательство в процесс управления ЛПП.

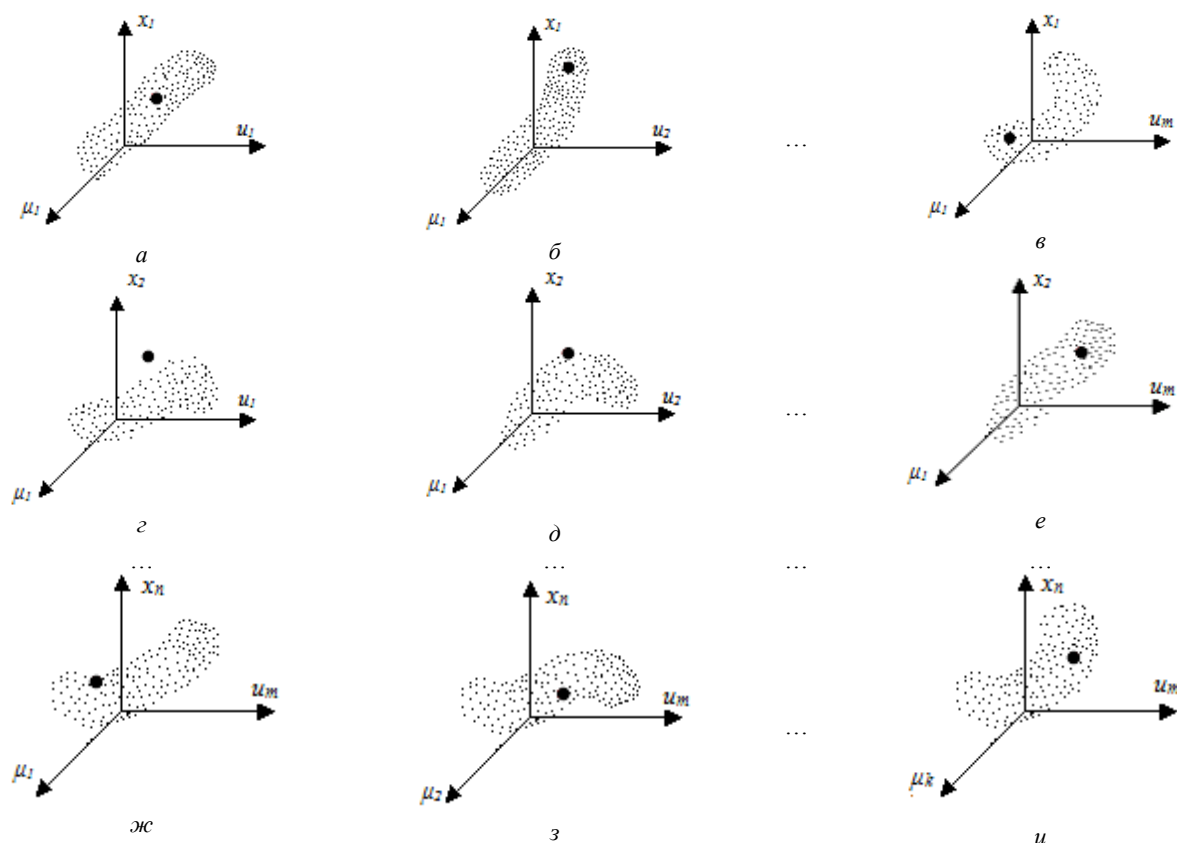


Рис. 8

Естественно, при разработке такой системы возникают некоторые специальные задачи, в частности, построение модели исследуемого процесса, если принять, что измерения выходной переменной $x(t) \in R^n$ или отдельных ее компонент осуществляются через значительные промежутки времени; восстановление «облака» в пространстве «входных-выходных» переменных по имеющейся обучающей выборке $\{u_i, \mu_i, x_i, i = \overline{1, S}\}$. На этом пути неизбежно возникнет требование максимального упрощения соответствующих алгоритмов с целью достижения необходимого быстрого действия.

Таким образом, при движении вышеприведенных сцен и текущего состояния процесса (или его прогноза) можно судить о характере его протекания, а также о необходимости вмешательства в ход процесса в случае необходимости.

На фоне традиционно используемых подходов при построении управляющих систем дискретно-непрерывными процессами, которые могут быть, в значительной степени, отнесены к категории параметрических, рассматриваются явно не традиционные направления.

Один из них, как уже не однократно обращалось внимание ранее, тесно связан с восстановлением обратного оператора управляемого процесса. Другой путь состоит в разработке, исследовании и практическом применении обучающихся алгоритмов при ши-

роком использовании компьютерных технологий при управлении сложными процессами.

Библиографические ссылки

1. Медведев А. В. К теории непараметрических систем. Управление-I // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 57–64.
2. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Физматгиз, 1963. 552 с.
3. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 320 с.
4. Власов Н. А. Антивещество. М.: Атомиздат, 1966. 184 с.
5. Вейль Г. Симметрия. М.: Наука, 1968. 191 с.

References

1. Medvedev A. V. *Vestnik SibGAU*, 2013, № 2 (48), p. 57–64.
2. Feldbaum A. A. *Osnovi teorii optimalnix i obuchayschihsya sistem* (Fundamentals of the optimal automatic systems theory). Moscow, Fizmatgiz, 1963, 552 p.
3. Tsyppkin J. Z. *Adaptacia i obuchenie v avtomaticheskikh sistemah* (The adaptation and learning in automatic systems). Moscow, Nauka, 1968, 320 p.
4. Vlasov N. A. *Antiveshchestvo* (Antimatter). Moscow, Atomizdat, 1966, 184 p.
5. Weil G. *Simetria* (Symmetry). Moscow, Nauka, 1968, 191p.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНЫХ УСТРОЙСТВ И ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СТАТИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Е. А. Мизрах, Н. В. Штабель

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

Проводится анализ статической точности имитаторов солнечных батарей двух структур: на основе стабилизатора тока с функциональной обратной связью по напряжению и на основе стабилизатора напряжения с функциональной обратной связью по току. Рассмотрено влияние вариаций параметров устройств на статические ошибки имитаторов, предложены способы повышения точности. Даны рекомендации по оптимальному выбору структуры имитатора с точки зрения минимальной ошибки. Проанализирован вклад вариации параметров каждого из устройств имитаторов в общую ошибку и рассмотрены устройства, к точности которых предъявляются повышенные требования, такие как функциональный преобразователь и измеритель тока. Проведено сравнение влияния методической и вариационной ошибок на точность имитаторов.

Ключевые слова: имитатор солнечных батарей, точность, первичный источник электроэнергии, испытания, функциональный преобразователь.

RESEARCH OF PARAMETERS VARIATIONS IMPACT ON THE STATIC ACCURACY OF SOLAR ARRAY SIMULATOR

E. A. Mizrah, N. V. Shtabel

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

The authors analyze the static accuracy of two types of solar array simulators: based on voltage regulator with current functional feedback and based on current regulator with voltage functional feedback. Parameters and signals variations impact on the static error of simulators is considered as well. The authors suggested the methods of improving the simulator accuracy and give recommendations for optimal selection of solar array simulator structure to achieve minimal error. The impact of parameter variations of solar array simulator devices on the entire error is shown. Along with it the authors consider the devices which meet the exclusive demands for accuracy, such as functional generator and current sensor. The comparison between the impact of systematic error and random error on the solar array simulator accuracy is drawn as well.

Keywords: solar array simulator, accuracy, primary power source, testing, functional generator.

При испытаниях энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов в настоящее время широко применяются имитаторы солнечных батарей (ИБС). При этом качество воспроизведения ВАХ и переходных процессов солнечной батареи является одной из наиболее важных характеристик ИБС, напрямую влияющих на качество испытаний. Точность воспроизведения ВАХ определяется статической точностью ИБС.

Статические ошибки могут быть обусловлены конкретной реализацией ИБС (схемой, примененными техническими решениями), а также видом воспроизводимой ВАХ, эти ошибки называются методическими [1]. Значительное влияние на погрешность воспроизведения ВАХ оказывают вариации параметров устройств, а также погрешности внешних воздействий (опорных напряжений, напряжений источников

питания и т. п.), такие ошибки называют вариационными.

ИБС могут быть выполнены [1] на основе стабилизатора тока с функциональной обратной связью по напряжению нагрузки (СТФОН) и стабилизатора напряжения с функциональной обратной связью по току (СНФОТ). Целью данной работы является анализ и сравнение статической точности ИБС структур СТФОН и СНФОТ.

Рассмотрим вначале структуру СТФОН, где усилитель мощности выполнен в виде эквивалентного генератора тока (ЭГТ), при этом приведенная вариационная ошибка представляется в виде:

$$\delta_{\text{прв}}(U) = \varepsilon_{\text{IP}}(U) + \varepsilon_{\text{YP}}(U) \quad (1)$$

где ε_{IP} – приведенная ошибка по току, определяется выражением:

$$\varepsilon_{IP} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial I_p}{\partial \ln a_j} \right)_0 \delta a_j + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial I_p}{\partial \ln x_i} \right)_0 \delta x_i \right\} \frac{1}{I_{K3}} \quad (2)$$

где ε_{IP} – приведенная ошибка по проводимости, определяется выражением:

$$\varepsilon_{IP} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial Y_p}{\partial \ln a_j} \right)_0 \Delta U \delta a_j + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial Y_p}{\partial \ln x_i} \right)_0 \Delta U \delta x_i \right\} \frac{1}{I_{K3}}, \quad (3)$$

Для вычисления вариационных ошибок необходимо задать относительные изменения параметров δa_j и переменных δx_i . Исходя из паспортных данных доступных на рынке устройств, можно задать следующие погрешности: погрешность источника опорного напряжения (ИОН) $\delta U_{оп} = 0,1 \%$, нестабильность напряжения источника питания усилителя мощности (УМ) $\delta f_2 = 20 \%$.

Рассмотрим вариационные ошибки в ИБС, выполненном по схеме СТФОН. Для определения влияния каждого из параметров на ошибку, воспользуемся выражениями для реального тока и реальной проводимости ИБС [2]:

$$I_p(U_p) = \frac{[U_{оп} - U_{fp}(U_p)] \cdot W_{K3} - I_{yp}(U_p) + f_2 \cdot W_{f2}}{1 + K_{ит} \cdot W_{K3}} \\ Y_p(U_p) = \frac{Y_0(U_p) + K_{fl}(U_p) \cdot W_{K3}}{1 + K_{ит} \cdot W_{K3}} \quad (4)$$

В соответствии с (2) вариационная ошибка по току имеет вид

$$\varepsilon_{IP}(U_T) := F_1(U_T) + F_2(U_T) + F_3(U_T) + F_4(U_T). \quad (5)$$

Запишем выражения слагаемых приведенной вариационной ошибки по току:

$$F_1(U_T) := \left| \frac{U_{оп}}{I_{K3}} \frac{W_{K3}}{1 + K_{ит} W_{K3}} \delta U_{оп} \right| \\ F_2(U_T) := \left| \frac{U_{fp}(U_T)}{I_{K3}} \frac{W_{K3}}{1 + K_{ит} W_{K3}} \delta U_{fp}(U_T) \right| \\ F_3(U_T) := \left| \frac{W_{K3}}{I_{K3}} \frac{U_{оп} - U_{fp}(U_T) - K_{ит} I_{y0}(U_T) + K_{ит} f_2 W_{f2}}{(1 + K_{ит} W_{K3})^2} \delta W_{K3} \right| \\ F_4(U_T) := \left| \frac{I_{y0}(U_T)}{I_{K3}} \frac{1}{1 + K_{ит} W_{K3}} \delta I_{y0}(U_T) \right| \\ F_5(U_T) := \left| \frac{f_2}{I_{K3}} \frac{W_{f2}}{1 + K_{ит} W_{K3}} \delta f_2 \right| \quad (6)$$

$$F_6(U_T) := \left| \frac{K_{ит}}{I_{K3}} \left[\frac{-(U_{оп} - U_{fp}(U_T)) W_{K3} - I_{y0}(U_T) + f_2 W_{f2}}{(1 + K_{ит} W_{K3})^2} W_{K3} \right] \delta K_{ит} \right|$$

Для обеспечения требуемой статической точности ИБС выполняется условие $K_{ит} W_{K3} \gg 1$. При этом из анализа выражений (6) следует:

а) вариации нелинейных потерь тока I_{y0} , напряжения питания f_2 слабо влияют на ошибку и, поэтому допуск на их изменение может быть весьма большим;

б) наиболее сильно влияющими на точность имитатора составляющими являются отклонения δW_{K3} коэффициента передачи прямого пути, погрешность δU_{fp} воспроизведения ФП требуемой нелинейной функции, погрешность $\delta K_{ит}$ ИТ.

Погрешность ФП в результате линеаризации распадается на две: погрешность δU_{fp} по напряжению и погрешность δK_{fl} по коэффициенту передачи. Но в формуле расчета ε_{IP} участвует только погрешность δU_{fp} . Анализ аналоговых схем ФП позволяет сделать вывод о том, что минимальная погрешность ФП может быть обеспечена порядка 1 %, для современных цифровых схем погрешность не превышает 0,5 % [3]. Статическая погрешность резистивного измерителя тока (ИТ) зависит от материала резистивного элемента, конструктивных особенностей и может быть обеспечена порядка 0,1 %. Вариация δW_{K3} коэффициента передачи прямого пути в основном определяется нелинейностью УМ и на основании экспериментальных данных принята 20 %.

Степень влияния каждого слагаемого можно оценить по рис. 1. Величины относительных отклонений выбраны исходя из реальных практических условий. Из рис. 1 видно, что в области холостого хода наибольшее влияние оказывает погрешность ФП. Погрешность ИОН, ИТ стопроцентно входят в ε_{IP} , вариации W_{K3} ослаблены, причем коэффициент ослабления тем больше, чем больше величина $K_{ит}$ при выполнении условия $K_{ит} W_{K3} > 1$.

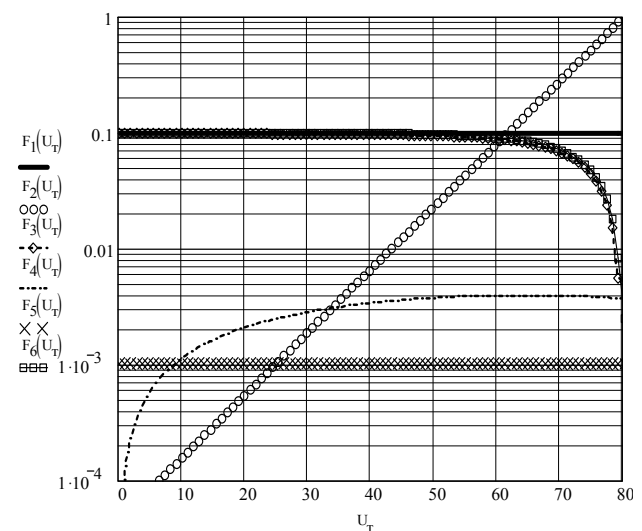


Рис. 1 Слагаемые вариационной ошибки по току для СТФОН:
 $\delta U_{оп} = 0,1 \%$; $\delta U_{fp} = 1 \%$; $\delta W_{K3} = 5 \%$; $\delta I_{y0} = 10 \%$;
 $\delta f_2 = 20 \%$; $\delta K_{ит} = 0,1 \%$

Рассмотрим влияние вариаций параметров на приведенную ошибку ε_{yp} по проводимости

$$\varepsilon_{yp}(U_T) := A_1(U_T) + A_2(U_T) + A_3(U_T) + A_4(U_T). \quad (7)$$

Выражение реальной проводимости для структуры СТФОН имеет вид:

$$Y_p(U_p) = \frac{Y_0(U_p) + K_{fl}(U_p) \cdot W_{k3}}{1 + K_{ит} \cdot W_{k3}} \quad (8)$$

где $Y_0(U_p)$ – проводимость нелинейного элемента в силовой цепи; $K_{fl}(U_p)$ – коэффициент передачи ФП в цепи обратной связи.

В соответствии с выражением (3) и, учитывая выражение (8) реальной проводимости для СТФОН, запишем выражения для слагаемых ε_{yp} :

$$\begin{aligned} A_1(U_T) &:= \left| \frac{Y_0(U_T)}{I_{k3}} \cdot \frac{\Delta U(U_T)}{1 + K_{ит} \cdot W_{k3}} \cdot \delta Y_0(U_T) \right| \\ A_2(U_T) &:= \left| \frac{K_{fl}(U_T)}{I_{k3}} \cdot \frac{W_{k3} \cdot \Delta U(U_T)}{1 + K_{ит} \cdot W_{k3}} \cdot \delta K_{fl}(U_T) \right| \\ A_3(U_T) &:= \left| \frac{W_{k3}}{I_{k3}} \cdot \frac{(K_{fl}(U_T) - K_{ит} \cdot Y_0(U_T)) \cdot \Delta U(U_T)}{(1 + K_{ит} \cdot W_{k3})^2} \cdot \delta W_{k3} \right| \\ A_4(U_T) &:= \left| \frac{K_{ит}}{I_{k3}} \cdot \left[\frac{-(Y_0(U_T) + K_{fl}(U_T) \cdot W_{k3})}{(1 + K_{ит} \cdot W_{k3})^2} \cdot W_{k3} \cdot \Delta U(U_T) \right] \cdot \delta K_{ит} \right| \end{aligned} \quad (9)$$

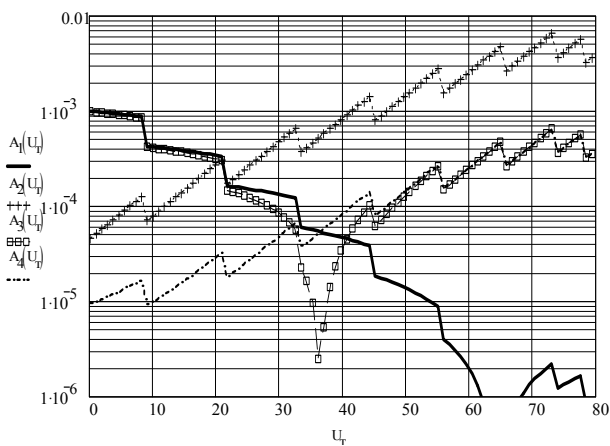


Рис. 2. Слагаемые вариационной ошибки по проводимости СТФОН, $\delta Y_0 = 20\%$; $\delta K_{fl} = 1\%$

Из рис. 2 видно, что наибольший вклад вносит также погрешность ФП, в целом же, слагаемые ε_{yp} по величине намного меньше слагаемых ε_{ip} .

На рис. 3 показаны приведенные ошибки, вычисленные при тех же исходных данных. Из рисунка видно, что полная ошибка $\delta_{прв}(U)$ определяется, глав-

ным образом, ошибкой по току ε_{ip} и возрастает в области холостого хода.

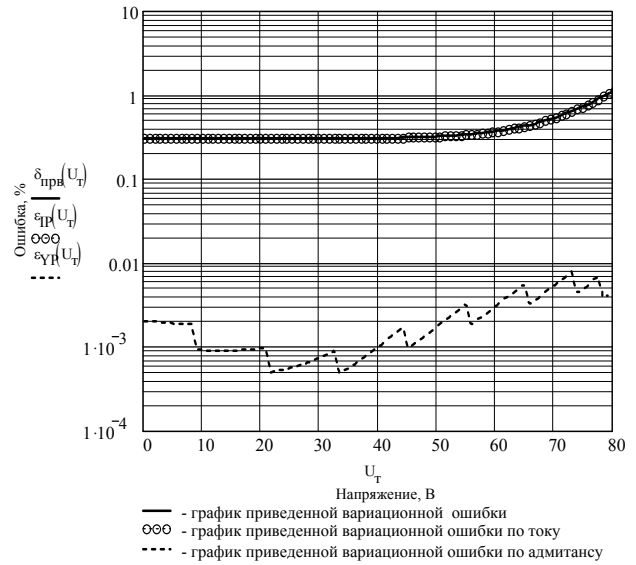


Рис. 3. Приведенные вариационные ошибки СТФОН

Максимальная ошибка $\delta_{прмак}$ (рис. 4) представляет собой сумму приведенных методической и вариационной ошибок и возрастает в области холостого хода. При выбранных параметрах звеньев и заданных отклонениях величина максимальной ошибки в области рабочей точки составляет 1 %, и не превышает 1,2 % в области холостого хода.

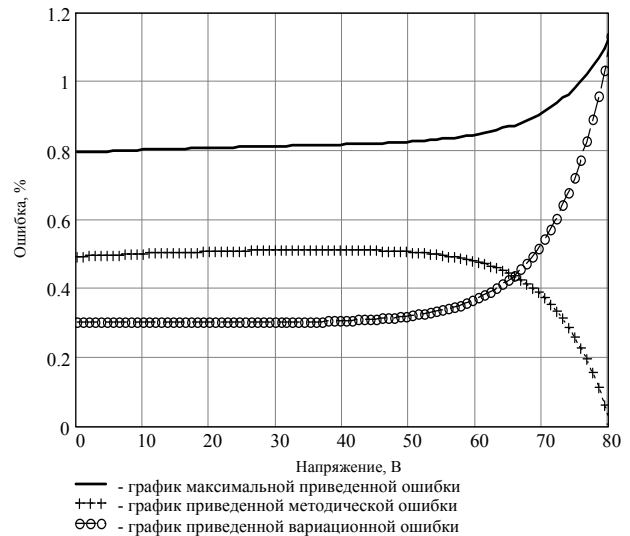


Рис. 4. Приведенные ошибки СТФОН при одном и том же напряжении нагрузки и $U_{хх} = 80\text{В}$

Регулирование ВАХ ИСБ может производиться не только по току, но и по напряжению, например, при имитации изменения температуры панели СБ. Авто-рами предложено проектировать ИСБ на максимальное значение напряжения холостого хода, а сжатие

ВАХ производить путем увеличения крутизны характеристики ФП с помощью масштабного усилителя [1].

Рассмотрим влияние на максимальную погрешность ИСБ сжатия ВАХ по напряжению до $U_{xx} = 20$ В. Из рис. 5 видно, что величины погрешностей ИСБ практически не изменились.

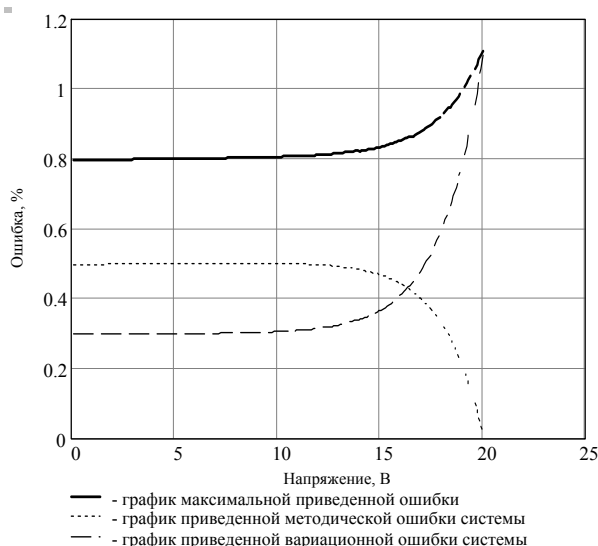


Рис. 5. Приведенные ошибки СТФОН при одном и том же напряжении нагрузки и $U_{xx} = 20$ В

Аналогичным образом произведем исследование ИБС, выполненного на основе структуры СНФОТ. Выражения для реального тока и проводимости [2] имеют вид:

$$I_p(U_p) = \frac{[U_{оп} - U'_{fp}(I_p)] \cdot W_{кз} - I_{yp}(U_p) + f_2 \cdot W_{f2}}{1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_p)},$$

$$Y_p(U_p) = \frac{Y_0(U_p) + K_{ин} \cdot W_{кз}}{1 + K_{fu}(I_p) \cdot W_{кз}} \quad (10)$$

На основе этих данных запишем выражения для слагаемых ошибки ε_{IP} :

$$F_1(U_T) := \left| \frac{U_{оп}}{I_{кз}} \cdot \frac{W_{кз}}{1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T)} \cdot \delta U_{оп} \right|$$

$$F_2(U_T) := \left| \frac{U_{fp}(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{W_{кз}}{1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T)} \cdot \delta U_{fp}(U_T) \right|$$

$$F_3(U_T) = \left| \frac{W_{кз} \cdot (U_{оп} - U_{fp}(U_T) + K_{ин} \cdot Z_H(U_T) \cdot I_{y0}(U_T) - K_{ин} \cdot Z_H(U_T) \cdot f_2 \cdot W_{f2})}{I_{кз} \cdot (1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T))^2} \cdot \delta W_{кз} \right|$$

$$F_4(U_T) := \left| \frac{I_{y0}(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{1}{1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T)} \cdot \delta I_{y0}(U_T) \right| \quad (11)$$

$$F_5(U_T) := \left| \frac{f_2}{I_{кз}} \cdot \frac{W_{f2}}{1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T)} \cdot \delta f_2 \right|$$

$$F_6(U_T) := \left| \frac{K_{ин}}{I_{кз}} \cdot \frac{[(U_{оп} - U_{fp}(U_T)) \cdot W_{кз} - I_{y0}(U_T) + f_2 \cdot W_{f2}]}{(1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T))^2} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T) \cdot \delta K_{ин} \right|$$

Также находим выражения слагаемых ошибки ε_{Yp} :

$$A_1(U_T) := \left| \frac{Y_0(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{1}{1 + K_{fu}(U_T) \cdot W_{кз}} \cdot \delta Y_0(U_T) \right|$$

$$A_4(U_T) := \left| \frac{K_{ин}}{I_{кз}} \cdot \frac{W_{кз}}{1 + K_{fu}(U_T) \cdot W_{кз}} \cdot \delta K_{ин} \right| \quad (12)$$

$$A_2(U_T) := \left| \frac{K_{fu}(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{[-Y_0(U_T) + K_{ин} \cdot W_{кз} + f_2 \cdot W_{f2}]}{(1 + K_{fu}(U_T) \cdot W_{кз})^2} \cdot W_{кз} \cdot \delta K_{fu}(U_T) \right|$$

$$A_3(U_T) := \left| \frac{W_{кз} \cdot (-K_{ин} + K_{fu}(U_T) \cdot Y_0(U_T) + K_{fu}(U_T) \cdot f_2 \cdot W_{f2})}{I_{кз} \cdot (1 + K_{fu}(U_T) \cdot W_{кз})^2} \cdot \delta W_{кз} \right|$$

Рассуждая аналогично структуре СТФОН, найдем приведенные ошибки по току и проводимости, а также суммарные вариационные и методические ошибки для СНФОТ (рис. 6 и 7).

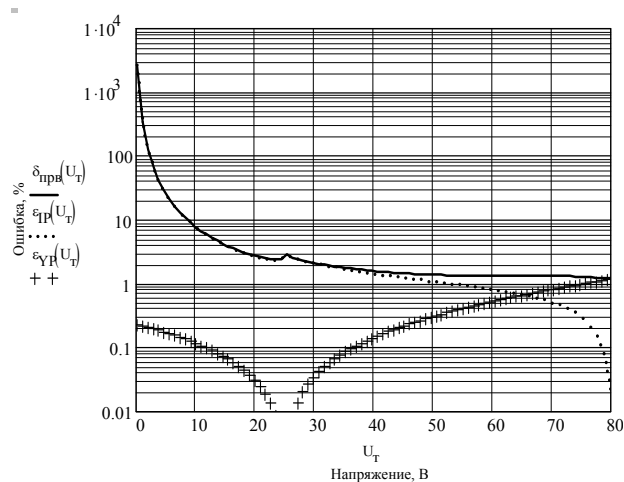


Рис. 6. Приведенные вариационные ошибки СНФОТ

Анализ приведенных ошибок СНФОТ показывает, что максимальная ошибка в основном определяется вариационной ошибкой и намного превышает ошибку СТФОН, особенно в области КЗ. При одних и тех же исходных данных максимальная ошибка структуры СНФОТ намного больше ошибки СТФОН, что предопределяет выбор структуры имитатора БС. Наибольшее влияние на ошибку ИБС в рассмотренных структурах оказывает ФП, что предъявляет высокие требо-

вания к его точности. Также уменьшить вариационную ошибку ИБС позволяет выбор высокоточных измерителя тока и ИОН.

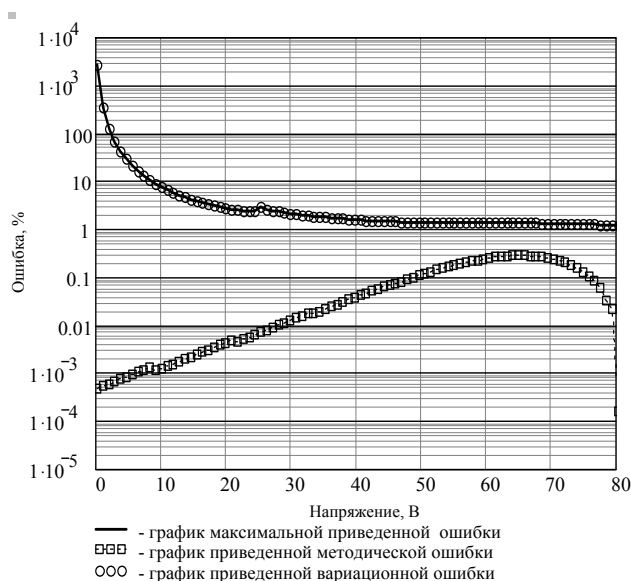


Рис. 7. Приведенные ошибки СНФОТ при одном и том же напряжении нагрузки

Библиографические ссылки

1. Мизрах Е. А. Исследование статической точности имитаторов солнечных батарей // Вестник СибГАУ. 2005. № 7. С. 24–27.
2. Мизрах Е. А. О выборе структуры имитатора первичного источника электроэнергии космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2002. №3. С. 50–54.
3. Штабель Н. В. Исследование цифрового функционального преобразователя для имитатора солнечных батарей. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов (6–10 апреля 2009, г. Красноярск) : в 2 т. Т. 1. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 376 с.

References

1. Mizrakh E. A. *Vestnik SibGAU*. 2005, № 7, p. 24–27.
2. Mizrakh E. A. *Vestnik SibGAU*. 2002, № 3, p. 50–54.
3. Shtabel' N. V. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики : sb. tez. dokl. Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov. Vol. 1. Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii. Soobshcheniya shkol'nikov* (Modern questions of aviation and astronautics) / SibGAU. Krasnoyarsk, 2009. 376 p.

© Мизрах Е. А., Штабель Н. В., 2013

УДК 517.55+517.929.4

УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ ЛИНЕЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ И АМЕБЫ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ГИПЕРПОВЕРХНОСТЕЙ

М. С. Рогозина

Сибирский федеральный университет
 Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
 E-mail: rogozina.marina@mail.ru

Рассматривается проблема устойчивости полиномиальных разностных операторов, основным источником появления которых является теория разностных схем. В исследовании используется терминология и методы этой теории, а также методы теории амёб алгебраических гиперповерхностей. Понятие амёбы позволяет сформулировать многомерный аналог условия, что все корни характеристического многочлена лежат в единичном круге, то есть условие устойчивости многомерных разностных схем. В терминах теории амёб алгебраических гиперповерхностей доказан критерий устойчивости многослойной линейной неоднородной разностной схемы. Получена формула, выражающая решение задачи Коши через ее фундаментальное решение.

Ключевые слова: разностная схема, устойчивость, амёба алгебраической гиперповерхности.

STABILITY OF MULTILAYER INHOMOGENEOUS DIFFERENCE SCHEMES AND AMOEBAS OF ALGEBRAIC HYPERSURFACES

M. S. Rogozina

Siberian Federal University

79 Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: rogozina.marina@mail.ru

We study the stability of polynomial difference operators coming mainly from the theory of difference schemes. In the study we use the terminology and the methods of this theory as well as those of the theory of amoebas of algebraic hypersurfaces. The notion of amoeba allows to formulate a multidimensional analog of the condition that all roots of the characteristic polynomial lie in the unit disc, i.e. the stability condition for multidimensional difference schemes. In the terms of the latter we formulate and prove the stability criterion for multilayer linear inhomogeneous difference schemes. A formula representing the solution to the Cauchy problem via its fundamental solution is obtained.

Keywords: difference scheme, stability, amoeba of algebraic hypersurfaces.

Разностные уравнения возникают в различных областях математики. В комбинаторном анализе разностные уравнения в сочетании с методом производящих функций дают мощный аппарат исследования перечислительных задач. Другой источник появления разностных уравнений – дискретизация дифференциальных. Так, дискретизация уравнения Коши-Римана привела к созданию теории дискретных аналитических функций, которая нашла применение в теории римановых поверхностей и комбинаторном анализе [1; 2]. Методы дискретизации дифференциальной задачи являются важной составной частью теории разностных схем и также приводят к разностным уравнениям [3]. Одно из важнейших свойств разностной схемы – устойчивость.

В теории Лакса [4] теорема эквивалентности утверждает, что если исходная дифференциальная задача корректна и схема аппроксимирует эту задачу, то устойчивость необходима и достаточна для сходимости.

В монографии [5] исследована устойчивость одно- и двухслойной линейной разностной схемы с постоянными коэффициентами. Условие устойчивости здесь дается в терминах, связанных с понятием разностной функции Грина задачи Коши. В работе [6] к исследованию устойчивости многослойных однородных разностных схем применяется теория амёб алгебраических гиперповерхностей.

В данной работе исследуется случай неоднородных разностных схем. В первом параграфе получена формула для решения задачи Коши через ее фундаментальное решение (Теорема 1). Во втором параграфе формулируется и доказывается критерий устойчивости задачи Коши для многослойной линейной неоднородной разностной схемы (Теорема 2) в терминах теории амёб алгебраических гиперповерхностей.

Формула для решения задачи Коши. Введем необходимые обозначения и определения.

Пусть δ_j оператор сдвига по j -ой переменной $\delta_j f(x) = f(x_1, \dots, x_{j-1}, x_j+1, x_{j+1}, \dots, x_n)$. Обозначим $P(\delta, \delta_{n+1}) = \sum_{(\alpha, \beta) \in A} a_{\alpha\beta} \delta^\alpha \delta_{n+1}^\beta$ – полиномиальный разностный оператор, то есть $A = (\alpha, \beta)$ – конечное

подмножество целочисленной решетки $\mathbb{Z}^{n+1}$, и $\delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)$, $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ и $\delta^\alpha = \delta_1^{\alpha_1} \delta_2^{\alpha_2} \dots \delta_n^{\alpha_n}$.

Рассмотрим разностные операторы с постоянными коэффициентами, характеристический многочлен $P(z, w)$ которых имеет вид

$$P(z, w) = P_m(z)w^m + P_{m-1}(z)w^{m-1} + \dots + P_0(z),$$

где $P_j(z)$ являются многочленами переменных $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ и коэффициент при старшей по w степени $P_m(z) \equiv 1$. Это означает, что $(0, m) \in A$

и для всех $(\alpha, \beta) \in A$, $(\alpha, \beta) \neq (0, m)$ выполняется условие $m > \beta$. (*)

Такие разностные уравнения возникают в теории разностных схем и ниже мы будем использовать терминологию этой теории.

Сформулируем задачу Коши для неоднородной $(m+1)$ -слойной линейной разностной схемы вида

$$\left[\delta_{n+1}^m + \sum_{k=1}^m P_k(\delta) \delta_{n+1}^{m-k} \right] f(x, y) = g(x, y), \quad (1)$$

где $P_j(\delta)$ – полиномиальные разностные операторы с постоянными коэффициентами; $g(x, y)$ – заданная функция и $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}^n$.

Найти решение $f(x, y)$ уравнения (1), удовлетворяющее начальным условиям

$$f(x, y) = \varphi_y(x), y = 0, 1, \dots, m-1, \quad (2)$$

где $\varphi_y(x)$ – заданные функции переменных $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}^n$.

Определение 1. Решение $P(x, y)$ разностного уравнения

$$P(\delta, \delta_{n+1})P(x, y) = \delta_{(0,0)}(x, y), (x, y) \in \mathbb{Z}^{n+1},$$

удовлетворяющее начальным условиям

$$P(x, y) = 0, y = 0, 1, \dots, m-1,$$

где $\delta_{(0,0)}(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } (x, y) \neq (0, 0) \\ 1, & \text{если } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$ называется фунда-

ментальным решением (функцией Грина) задачи (1)–(2).

Определим на $\mathbb{Z}^{n+1}$ две функции:

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \varphi_y(x), & \text{для } x \in \mathbb{Z}^n, y = 0, 1, \dots, m-1, \\ 0, & \text{для } x \in \mathbb{Z}^n, y \geq m; \end{cases}$$

$$\mu(x, y) = \sum_{(\alpha, \beta) \in A} a_{\alpha\beta} \varphi(x + \alpha, y + \beta), x \in \mathbb{Z}^n, -m \leq y < 0.$$

Обозначим через $\Pi = \{(x, y) \in \mathbb{Z}^{n+1} : y \geq 0\}$ «полупространство» $\mathbb{Z}^{n+1}$.

Приведем формулу для решения задачи (1)–(2), в которой искомое решение выражается через входные данные и фундаментальное решение.

Теорема 1. Если $f(x, y)$ решение задачи Коши (1)–(2), то для $(x, y) \in \Pi$ справедлива формула $f(x, y) = f_0(x, y) + f^*(x, y)$, где

$$f_0(x, y) = \sum_{(x', y')} \mu(x', y') P(x - x', y - y'), \quad (3)$$

причем суммирование проводится по всем точкам $(x', y') \in \mathbb{Z}^{n+1}$, удовлетворяющим условию $-m \leq y' < 0$, а

$$f^*(x, y) = \sum_{(x', y')} g(x', y') P(x - x', y - y'), \quad (4)$$

где суммирование проводится по всем точкам $(x', y') \in \mathbb{Z}^{n+1}$, удовлетворяющим условию $0 \leq y' \leq m-1$. При этом для любого фиксированного $(x, y) \in \Pi$ число слагаемых для f_0 и f^* конечно.

Замечание. Отметим, что $f_0(x, y)$ – решение однородной задачи Коши, $f^*(x, y)$ – частное решение с нулевыми начальными данными.

В случае двухслойных разностных схем эта формула была получена в монографии [5], для задачи Коши в положительном октанте $\mathbb{Z}_+^{n+1}$ целочисленной решетки $\mathbb{Z}^n$ в [7], для многослойных однородных разностных схем в [6].

Для доказательства теоремы 1 нам потребуется следующая лемма.

Лемма. Пусть K – конус в $\mathbb{R}^{n+1}_{(x, y)}$ порожденный векторами $a^j = (a^j_1, \dots, a^j_n, a^j_{n+1}), j = 1, 2, \dots, m$.

$$K = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^{n+1} : (x, y) = \sum_{j=1}^m \lambda_j a^j, \lambda_j \geq 0 \right\}.$$

Если $a^j_{n+1} > 0$ для $j = 1, \dots, m$, то пересечение конуса K с гиперплоскостью $y = \text{const}$ является ограниченным множеством.

Доказательство. Всякая точка $(x, y) \in K$ представляется в виде $(x, y) = \sum_{j=1}^m \lambda_j a^j$, где $\lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, m$.

Точки $(x, y) \in K \cap \{y = \text{const}\}$, следовательно, определяются из уравнения относительно $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ вида

$$a^1_{n+1} \lambda_1 + \dots + a^m_{n+1} \lambda_m = \text{const},$$

в котором коэффициенты $a^j_{n+1} > 0$. Множество $\Lambda = \{\lambda\}$ решений $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m)$ такого уравнения – ограниченное множество в $\mathbb{R}^m$, а конус K можно рассматривать как образ множества Λ при линейном преобразовании,

матрица которого составлена из координат векторов a^j .

Доказательство теоремы 1. Покажем, что число слагаемых в правой части формул (3), (4) конечно. Из ограничения (*) на характеристический многочлен $P(z, w)$ следует, что $m - \beta > 0$ для всех $(\alpha, \beta) \in A, (\alpha, \beta) \neq (0, m)$. Ниже (см. § 2) будет показано, что носитель фундаментального решения $P(x, y)$ (т. е. множество $\text{supp} P = (x, y) : P(x, y) \neq 0$) лежит в конусе K порожденном векторами $(0, m) - (\alpha, \beta)$. Согласно лемме, для фиксированного y это означает, что число значений фундаментального решения $P(x, y)$, не равных нулю, конечно.

Докажем, что формулы (3), (4) дают решение уравнения (1). Действительно,

$$P(\delta, \delta_{n+1})f = P(\delta, \delta_{n+1})f_0(x, y) + P(\delta, \delta_{n+1})f^*(x, y).$$

При $y \geq 0$ с учетом определения фундаментального решения для любых $(x, y) \in \Pi$, имеем $y - y' > 0$, т. е. $\sum_{(x', y')} \mu(x', y') \delta_{(0,0)}(x - x', y - y') = 0$, тогда

$$\begin{aligned} P(\delta, \delta_{n+1})f &= \sum_{(x', y') : -m \leq y' < 0} \mu(x', y') \delta_{(0,0)}(x - x', y - y') + \\ &+ \sum_{(x', y') : y' \geq 0} g(x', y') \delta_{(0,0)}(x - x', y - y') = g(x, y). \end{aligned}$$

Проверим выполнение условия (2).

Пусть $0 \leq y \leq m-1$. Так как суммирование здесь ведется по всем (x', y') таким, что $-m \leq y' \leq -1$, то $f^*(x, y) = 0$. Имеем

$$\begin{aligned} f(x, y) &= f_0(x, y) = \\ &= \sum_{(x', y')} \left(\sum_{(\alpha, \beta) \in A} a_{\alpha\beta} \varphi(x' + \alpha, y' + \beta) \right) P(x - x', y - y'). \end{aligned}$$

Во внутренней сумме суммируем по тем (α, β) , для которых $-y' \leq \beta \leq m$, так как для остальных (α, β) имеем $\varphi(x' + \alpha, y' + \beta) = 0$.

Меняя порядок суммирования

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \sum_{(\alpha, \beta) \in A} a_{\alpha\beta} \sum_{(x', y')} \varphi(x' + \alpha, y' + \beta) \times \\ &\times P(x + \alpha - (x' + \alpha), y + \beta - (y' + \beta)) \end{aligned}$$

и индексы суммирования $x'' = x' + \alpha, y'' = y' + \beta$ после приведения во внутренней сумме подобных при $\varphi(x'', y'')$, получим

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \sum_{(\alpha, \beta)} a_{\alpha\beta} \sum_{(x'', y'')} \varphi(x'', y'') P(x + \alpha - x'', y + \beta - y'') = \\ &= \sum_{(x'', y'')} \varphi(x'', y'') \sum_{(\alpha, \beta) \in A : y'' + 1 \leq \beta \leq m} a_{\alpha\beta} P(x - x'' + \alpha, y - y'' + \beta). \end{aligned}$$

Здесь уже суммируем по (x'', y'') таким, что $0 \leq y'' \leq m-1$ и по (α, β) таким, что $y'' + 1 \leq \beta \leq m$, поэтому для $0 \leq \beta \leq y''$ в силу неравенств $0 \leq y \leq m-1$ по определению фундаментального решения имеем $P(x - x'' + \alpha, y - y'' + \beta) = 0$.

Тогда

$$\begin{aligned}
f(x, y) &= \sum_{(x'', y'') : 0 \leq y'' \leq m-1} \varphi(x'', y'') \times \\
&\times \sum_{(\alpha, \beta) \in A : 0 \leq \beta \leq m} a_{\alpha, \beta} \mathcal{P}(x - x'' + \alpha, y - y'' + \beta) = \\
&= \sum_{(x'', y'')} \varphi(x'', y'') P(\delta, \delta_{n+1}) \mathcal{P}(x - x'', y - y'') = \\
&= \sum_{(x'', y'')} \varphi(x'', y'') \delta_{(0,0)}(x - x'', y - y'') = \varphi(x, y).
\end{aligned}$$

Устойчивость и амёбы алгебраических гиперповерхностей. Приведем некоторые сведения из теории амёб алгебраических гиперповерхностей (см. [8]).

Определение 2. Многогранником Ньютона N_P многочлена $P(z, w) = \sum_{(\alpha, \beta) \in A} a_{\alpha, \beta} z^\alpha w^\beta$ называется выпуклая оболочка в $\mathbb{R}^{n+1}$ элементов множества A .

Пусть $V = \{(z, w) \in \mathbb{C}^{n+1} : P(z, w) = 0\}$ – множество нулей многочлена $P(z, w)$, оно называется характеристическим множеством.

Определение 3. Амёбой алгебраической гиперповерхности называется образ множества нулей V многочлена $P(z, w) = \sum_{(\alpha, \beta) \in A} a_{\alpha, \beta} z^\alpha w^\beta$ при отображении

$$\begin{aligned}
\log: (z, w) &= (z_1, \dots, z_n, w) \rightarrow \\
&\rightarrow (\log|z_1|, \dots, \log|z_n|, \log|w|) = (\log|z|, \log|w|).
\end{aligned}$$

Отметим следующие свойства амёбы.

Множество V , а значит и $\log V$, замкнуто, поэтому его дополнение открыто. Оно состоит из конечного числа связанных выпуклых компонент и вершине $(0, m)$ многогранника Ньютона N_P соответствует связанная компонента $E_{0,m}$ дополнения амёбы, в которой рациональная функция $\frac{1}{P(z, w)}$ разлагается в ряд Лорана вида

$$\begin{aligned}
\frac{1}{P(z, w)} &= \frac{1}{w^m + \sum_{(\alpha, \beta) \in A'} a_{\alpha, \beta} z^\alpha w^\beta} = \\
&= \frac{1}{w^m (1 - \sum_{(\alpha, \beta) \in A'} (-a_{\alpha, \beta}) z^\alpha w^{\beta-m})} = \\
&= \frac{1}{w^m} \sum_{k=0}^{\infty} (-a_{\alpha, \beta} z^\alpha w^{\beta-m})^k = \sum_{(x, y) \in (0, m) + K_{0,m} \cap \mathbb{Z}^{n+1}} \frac{\mathcal{P}(x, y)}{z^x w^{y+1}}
\end{aligned}$$

где $A' = A \setminus \{0, m\}$, $(x, y) \in (0, m) + K_{0,m} \cap \mathbb{Z}^{n+1}$, а $K_{0,m}$ – конус, построенный на векторах $(0, m) - (\alpha, \beta)$, $(\alpha, \beta) \in A$.

Непосредственно проверяется, что $\mathcal{P}(x, y)$ – фундаментальное решение и $\text{supp } P \subset K_{0,m}$.

Для произвольной функции $\varphi(x, y)$, заданной в полупространстве $\Pi = \{(x, y) \in \mathbb{Z}^{n+1} : y \geq 0\}$, определим ее норму следующим образом

$$\|\varphi(x, y)\| = \sup_{(x, y) \in \Pi} |\varphi(x, y)|. \quad (5)$$

Определение 4. Назовем задачу (1)–(2) устойчивой, если существует константа $L > 0$ такая, что при любых ограниченных начальных данных (2) и ограниченной правой части $g(x, y)$ для соответствующего решения f выполняется неравенство

$$\|f\| \leq L \cdot (\|\varphi\| + \|g\|).$$

Теорема 2. Пусть $E_{0,m}$ – связанная компонента дополнения амёбы характеристического многочлена $P(z, w)$, соответствующая вершине $(0, m)$ многогранника Ньютона. Задача Коши (1)–(2) устойчива тогда и только тогда, когда начало координат принадлежит $E_{0,m}$, т. е. $(0, 0) \in E_{0,m}$.

Доказательство. Пусть задача (1)–(2) устойчива, докажем, что начало координат принадлежит $E_{0,m}$.

Для произвольной фиксированной точки $(x_1, y_1) \in \Pi$ найдем решение задачи (1)–(2) для начальных данных $\varphi(x, y) \equiv 0$ и правой части $g(x, y)$, построенной, следующим образом:

$$g_{(x_1, y_1)}(x, y) = \begin{cases} \frac{\mathcal{P}_m(x_1 - x, y_1 - y)}{|\mathcal{P}_m(x_1 - x, y_1 - y)|}, & \mathcal{P}_m(x_1 - x, y_1 - y) \neq 0, \\ 0, & \mathcal{P}_m(x_1 - x, y_1 - y) = 0. \end{cases}$$

Согласно теореме 1, для решения $f_{(x_1, y_1)}(x, y)$ задачи (1)–(2) с этими входными данными $\varphi(x, y) \equiv 0$, $g = g_{(x_1, y_1)}$ имеем

$$f_{(x_1, y_1)}(x, y) = \sum_{(x', y') \in \Pi} g_{(x_1, y_1)}(x', y') \mathcal{P}_m(x - x', y - y').$$

При $(x, y) = (x_1, y_1)$ получим, что

$$\begin{aligned}
f_{(x_1, y_1)}(x, y) &= \sum_{(x', y') \in \Pi} \frac{\mathcal{P}_m(x_1 - x', y_1 - y')}{|\mathcal{P}_m(x_1 - x', y_1 - y')|} \mathcal{P}_m(x_1 - x', y_1 - y') = \\
&= \sum_{(x', y') \in \Pi} |\mathcal{P}_m(x_1 - x', y_1 - y')| = \sum_{(x'', y'')} |\mathcal{P}_m(x'', y'')|.
\end{aligned}$$

Так как $\|\varphi\| = 0$ и $\|g_{(x_1, y_1)}\| \leq 1$, то в силу устойчивости задачи (1)–(2) получим

$$|f_{(x_1, y_1)}(x_1, y_1)| = \sum_{(x'', y'')} |\mathcal{P}_m(x'', y'')| \leq K$$

для некоторого $K > 0$ и произвольной точке $(x_1, y_1) \in \Pi$.

Это означает, что ряд $\sum \frac{|\mathcal{P}_m(x, y)|}{z^x w^{y+1}}$ сходится при $z = 1$, $w = 1$, а значит точка $(0, 0) \in E_{0,m}$.

Пусть начало координат $(0, 0) \in E_{0,m}$, докажем, что задача Коши (1)–(2) устойчива.

Пусть $\varphi(x, y)$ – начальные данные и $\|\varphi\| < +\infty$. Согласно теореме 1 соответствующее решение разностного уравнения можно записать в виде

$$\begin{aligned}
f(x, y) &= \sum_{(x', y')} \mu(x', y') \mathcal{P}(x - x', y - y') + \\
&+ \sum_{(x', y')} g(x', y') \mathcal{P}(x - x', y - y'),
\end{aligned}$$

где

$$\mu(x, y) = \sum_{(\alpha, \beta) \in A} a_{\alpha, \beta} \varphi(x + \alpha, y + \beta), x \in \mathbb{Z}^n, -m \leq y < 0.$$

Оценим функцию $f(x, y)$:

$$\begin{aligned} |f(x, y)| &\leq \sum_{(x', y') \in A} \sum_{(\alpha, \beta) \in A} |a_{\alpha, \beta}| |\varphi(x' + \alpha, y' + \beta)| |\mathcal{P}(x - x', y - y')| + \\ &+ \sum_{(x', y')} |g(x', y')| |\mathcal{P}(x - x', y - y')| \leq \\ &\leq \|\varphi\| \sum_{(x', y') \in A} \sum_{(\alpha, \beta) \in A} |a_{\alpha, \beta}| |\mathcal{P}(x - x', y - y')| + \\ &+ \|g\| \sum_{(x', y')} |\mathcal{P}(x - x', y - y')| \leq \\ &\leq L_1 \|\varphi\| \sum_{(x', y')} |\mathcal{P}(x - x', y - y' + 1)| + \\ &+ \|g\| \sum_{(x', y')} |\mathcal{P}(x - x', y - y')|, \end{aligned}$$

где $L_1 = \sum_{(\alpha, \beta) \in A} |a_{\alpha, \beta}|$.

Так как точка $(0, 0) \in E_{0, m}$, то ряд $\sum_{(x, y) \in \Pi} \frac{\mathcal{P}(x, y)}{z^x w^y}$

сходится, причем абсолютно в точке $z = 1, w = 1$, т. е. $\sum_{(x, y) \in \Pi} |\mathcal{P}(x, y)| \leq L_2$, где L_2 – некоторая константа.

Получаем

$$|f(x, y)| \leq L_1 \cdot L_2 \cdot \|\varphi\| + L_2 \cdot \|g\| \leq L \cdot (\|\varphi\| + \|g\|),$$

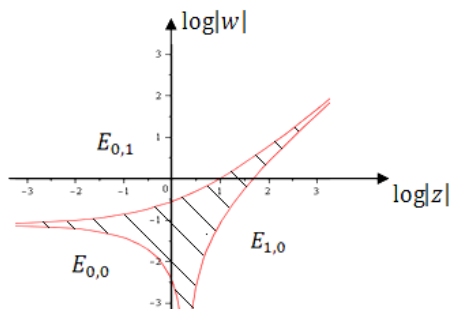
где $L = \max\{L_1 \cdot L_2, L_2\}$ и по определению это означает, что задача Коши (1)–(2) устойчива.

В качестве примера, иллюстрирующего теорему 2, рассмотрим задачу (1)–(2) для разностного оператора

$$\mathcal{P}(\delta_1, \delta_2) = \delta_2 - \frac{1}{4}\delta_1 - \frac{1}{3}.$$

Амеба его характеристического многочлена

$P(z, w) = w - \frac{1}{4}z - \frac{1}{3}$ имеет вид представленный на рисунке:



Обозначения на рисунке следующие: $E_{0,1}$, $E_{1,0}$, $E_{0,0}$ – компоненты дополнения амебы, соответствующие вершинам $(0, 1)$, $(1, 0)$, $(0, 0)$ многогранника Ньютона. Заштрихованная на рисунке область – амеба.

По рисунку видно, что $(0; 0) \in E_{0,1}$, поэтому задача (1)–(2) для этого оператора устойчива. Тот же результат получается, если использовать известные методы теории схем [4].

Библиографические ссылки

1. Duffin R. J. Basic Properties of Discrete Analytic Functions // Duke Math. J. 1956. Vol. 23. P. 335–363.
2. Данилов О. А., Медных А. Д. Дискретные аналитические функции многих переменных и формула Тейлора // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. 2009. Т. 9, № 2. С. 38–46.
3. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 552 с.
4. Рябенский В. С. Введение в вычислительную математику. М.: Физматлит, 2000. 296 с.
5. Федорюк М. В. Асимптотика: интегралы и ряды. М.: Наука, 1987. 544 с.
6. Рогозина М. С. Устойчивость многослойных разностных схем и амебы алгебраических гиперповерхностей // Журнал СФУ. Математика и физика. 2012. Т. 5, № 2. С. 256–263.
7. Лейнартас Е. К. Устойчивость задачи Коши для многомерного разностного оператора и амеба характеристического множества // Сиб. матем. журн., 2011. Т. 52, № 5. С. 387–393.
8. Forsberg M., Passare M., Tsikh A. Laurent determinants and arrangements of hyperplane amoebas // Advances in Mathematics, 2000. Vol. 151, № 1. P. 45–70.

References

1. Duffin R. J. Basic Properties of Discrete Analytic Functions. Duke Math. J. 1956, vol. 23, p. 335–363.
2. Danilov O. A., Mednykh A. D. *Vestnik NGU. Seriya: Matematika, mekhanika, informatika*. 2009. Vol. 9, issue. 2, p. 38–46.
3. Samarskiy A. A. *Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem* (Introduction to the theory of difference schemes). Moscow, Nauka, 1971, 552 p.
4. Ryaben'kiy V. S. *Vvedenie v vychislitel'nyuyu matematiku* (Introduction to computational mathematics). Moscow, FIZMATLIT, 2000, 296 p.
5. Fedoryuk M. V. *Asimptotika: integraly i ryady* (Asymptotics: integrals and series). Moscow, Nauka, 1987, 544 p.
6. Rogozina M. S. *Zhurnal SFU. Matematika i fizika*. 2012, vol. 5, № 2, p. 256–263.
7. Leynartas E. K. *Sib. matem. zhurn.*, 2011, vol. 52, № 5, s. 387–393.
8. Forsberg M., Passare M., Tsikh A., Laurent determinants and arrangements of hyperplane amoebas, *Advances in Mathematics*, 2000, vol. 151, № 1, p. 45–70.

© Рогозина М. С., 2013

ОБ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ КРУЧЕНИИ СТЕРЖНЯ*

С. И. Сенашов¹, О. Н. Черепанова², А. В. Кондрин¹¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sen@sibsau.ru²Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

Решена классическая задача о кручении прямого стержня поперечное сечение которого ограничено выпуклым контуром. Предполагается, что пластическая область охватывает всю внешнюю границу. Для решения задачи используются законы сохранения. Для кусочно-гладких границ решение найдено квадратурой. Написаны программы, позволяющие с любой точностью строить пластические и упругие области в скручиваемом стержне. Тестирование на известных решениях дало совпадение результатов.

Ключевые слова: законы сохранения, точные решения, неизвестная граница, задача кручения прямого стержня.

ABOUT ELASTOPLASTIC TORSION OF ROD

S. I. Senashov¹, O. N. Cherepanova², A. V. Kondrin¹¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sen@inbox.ru²Siberian Federal University
79 Svobodny prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia

The classic problem of torsion of a straight rod with the cross-section being limited to a convex contour, has been solved. It is assumed that the domain of plasticity covers the entire external boundary. The laws of conservation are used to solve the problem. The solution for a piecewise smooth boundary is found with quadrature. The programs developed allow to construct plastic and elastic ranges with any precision in the torsion rod. Testing based on the known solutions gave the coincidence of the results.

Keywords: conservation law, exact solution, unknown boundary, the problem of torsion of a straight rod.

Рассмотрим упруго-пластическое кручение прямого стержня, поперечное сечение которого ограничено выпуклым контуром Γ .

При достаточно большом значении крутящего момента в стержне образуется пластическая область P . Она начинает образовываться на внешнем контуре Γ . Предположим, что пластическая область полностью охватила контур. Тогда в поперечном сечении возникают две области – пластическая P и упругая F , L – граница раздела областей.

Решению задачи о напряженном состоянии упруго-пластического стержня посвящено много работ, но большинство из них основываются на некоторых предположениях о форме границы L , которая, вообще говоря, заранее не известна. Оригинальный метод по определению неизвестной границы предложен Б. Д. Анниным [1].

Этот метод основан на контактных преобразованиях и позволяет определить границу раздела между упругой и пластической областью в стержнях овального поперечного сечения. Постановку задачи и под-

робный обзор результатов можно найти в [1] и цитируемой там литературе.

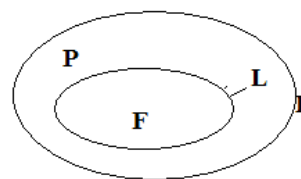


Рис. 1

В предлагаемой работе с помощью законов сохранения определяется напряженное состояние во всех внутренних точках стержня, и предлагаются формулы для аналитических вычислений этих напряжений для случая кусочно-гладкой ориентированной границы поперечного сечения. Законы сохранения уже давно и плодотворно используются для решения многих задач математики и механики. Краткий обзор результатов и решенных задач из разных областей механики можно найти в [2–4].

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, шифр проекта 1.3720.2011.

Постановка задачи. Пусть τ_{xz}, τ_{yz} – единственные ненулевые компоненты тензора напряжений. В упругой зоне они удовлетворяют уравнению равновесия

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

и уравнениям

$$\tau_{xz} = G\theta \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - y \right), \quad \tau_{yz} = G\theta \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + x \right). \quad (2)$$

Здесь функция $\theta\psi(x, y)$ определяет деформацию поперечного сечения, θ – постоянная, G – модуль упругости при сдвиге.

Введем функцию напряжения φ по формуле

$$\tau_{xz} = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad \tau_{yz} = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (3)$$

тогда для определения φ в упругой области получаем уравнение

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = a \quad (4)$$

где $a = -2G\theta$ – постоянная, не равная нулю.

В пластической области компоненты τ_{xz}, τ_{yz} помимо уравнения равновесия удовлетворяют условию пластичности

$$\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 = 1. \quad (5)$$

Здесь, для простоты дальнейших вычислений, постоянную пластичности считаем равной единице.

Вводя в это уравнение функцию напряжения, получаем

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 = 1. \quad (6)$$

Граничные условия. Предположим, что боковая поверхность свободна от напряжений. Это означает, что $\frac{\partial \varphi}{\partial l} = 0$ – на контуре Γ . Здесь $\vec{l} = (l_1, l_2)$ – касательная к контуру Γ . Отсюда получаем, что $\varphi = \text{const}$ вдоль контура Γ . Поскольку Γ односвязный контур, то полагаем, что $\varphi = 0$ на Γ .

Окончательно получаем следующую задачу:

В области ограниченной кривой L необходимо решить уравнение

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = a. \quad (7)$$

В области ограниченной кривыми L и Γ (т. е. в области пластичности P) функция φ удовлетворяет уравнению

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 = 1. \quad (8)$$

На Γ для функции φ выполняются условия

$$\varphi = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial l} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} l_1 + \frac{\partial \varphi}{\partial y} l_2 = 0 \quad (10)$$

на границе раздела L функция φ непрерывна.

Требуется найти φ в упругой и пластической областях, а так же найти границу раздела L .

Введем обозначения $\varphi'_x = u$, $\varphi'_y = v$. Тогда уравнения (7)–(8) примут вид

$$F_1 = u'_x + v'_y - a = 0, \quad (11)$$

$$u^2 + v^2 = 1. \quad (12)$$

В силу введенных обозначений будет выполняться равенство

$$F_2 = u'_y - v'_x = 0 \quad (13)$$

Определение. Назовем вектор (A, B) сохраняющимся током, для системы уравнений (11), (13), если выполнено соотношение

$$\partial_x A + \partial_y B = \Delta_1 F_1 + \Delta_2 F_2 = 0. \quad (14)$$

Здесь Δ_1, Δ_2 некоторые линейные дифференциальные операторы.

Это означает, что для функций A и B справедлив закон сохранения на всех решениях системы (11), (13)

$$\partial_x A + \partial_y B = 0 \quad (15)$$

Закон сохранения (15) в силу уравнений (11), (9) имеет вид

$$A_x + A_u u_x + A_v v_x + B_y + B_u u_y + B_v v_y = 0$$

или, учитывая, что $u_x = a - v_y$ и $u_y = v_x$,

$$A_x + A_u a - A_u v_y + A_v v_x + B_y + B_u v_x + B_v v_y = 0.$$

Из последнего равенства следует, что функции A и B удовлетворяют уравнениям

$$A_x + A_u \cdot a + B_y = 0, \quad (16)$$

$$B_y - A_u = 0, \quad A_v + B_u = 0 \quad (17)$$

(16)–(17) – уравнения Коши-Римана.

Рассмотрим область D с границей Γ , при условии, что область пластичности P полностью охватывает упругую зону F . Пусть Γ – гладкая ориентированная кривая, т. е. непрерывно дифференцируемая кривая без особых точек.

Из закона сохранения (15) следует, что

$$\iint_D (\partial_x A + \partial_y B) dx dy = 0. \quad (18)$$

Из (18), используя формулу Грина, получаем

$$\oint_{\Gamma} A dy - B dx = 0. \quad (19)$$

Наша задача найти такую область F принадлежащую, вместе с ее границей L области D , в которой выполняется неравенство $u^2 + v^2 < 1$.

Пусть $A = \alpha u + \beta v$, $B = \alpha v - \beta u + \gamma$, тогда

$$A_x = \alpha_x u + \alpha u_x + \beta_x v + \beta v_x \quad (20)$$

$$B_y = \alpha_y v + \alpha v_y - \beta_y u - \beta u_y + \gamma_y. \quad (21)$$

Согласно закону сохранения (15) получаем равенство

$$\begin{aligned} A_x + B_y &= \alpha_x u + \alpha u_x + \beta_x v + \beta v_x + \\ &+ \alpha_y v + \alpha v_y - \beta_y u - \beta u_y + \gamma_y = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

из которого следуют условия на функции α, β и γ

$$\begin{cases} \alpha_x - \beta_y = 0, \\ \beta_x + \alpha_y = 0, \\ a\alpha + \gamma_y = 0. \end{cases} \quad (22):$$

Рассмотрим два решения системы уравнений (22).

Первое имеет вид

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \\ \beta_1 &= \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \\ \gamma_{1y} &= -a \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \end{aligned} \quad (23),$$

тогда

$$\gamma_1 = -a \cdot \arctg \frac{y - y_0}{x - x_0} \quad (24)$$

Соответственно второе возьмем в виде

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad \beta_2 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \\ \gamma_{2y} &= -a \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{тогда } \gamma_2 = -\frac{a}{2} \cdot \ln((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)$$

Перепишем уравнение (19) для функций A и B :

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma} A dy - B dx &= \oint_{\Gamma} (\alpha u + \beta v) dy - (\alpha v - \beta u + \gamma) dx = \\ &= \oint_{\Gamma} \left(-\alpha \frac{l_2}{l_1} + \beta \right) v dy - \left(\alpha \frac{l_1}{l_2} - \beta \right) u dx - \oint_{\Gamma} \gamma dx = \\ &= \oint_{\Gamma} \left(-\alpha \frac{l_2}{l_1} + \beta \right) \frac{\partial \varphi}{\partial y} dy - \left(\alpha \frac{l_1}{l_2} - \beta \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx - \oint_{\Gamma} \gamma dx = \\ &= \oint_{\Gamma} \left(-\alpha \frac{l_2}{l_1} \right) v dy - \left(\alpha \frac{l_1}{l_2} \right) dx - \oint_{\Gamma} \gamma dx + \oint_{\Gamma} \beta \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} dy + \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx \right) = \\ &= \oint_{\Gamma} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

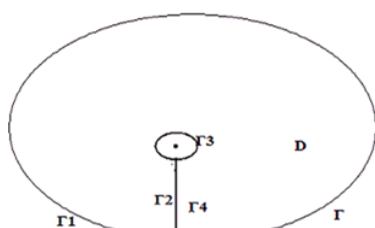


Рис. 2

Разобьем границу Γ на части, т. е. $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 + \Gamma_4$, где Γ_3 – окружность $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$.

Тогда

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma} A dy - B dx &= \oint_{\Gamma} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = \\ &= \oint_{\Gamma_1} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx + \oint_{\Gamma_2} \alpha u dy - \\ &+ (\alpha v + \gamma) dx + \oint_{\Gamma_3} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx + \\ &+ \oint_{\Gamma_4} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Очевидно, что $\oint_{\Gamma_2} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx + \oint_{\Gamma_4} \alpha u dy + (\alpha v + \gamma) dx = 0$. С учетом этого условия уравнение (25) примет вид

$$\oint_{\Gamma_3} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = -\oint_{\Gamma_1} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx. \quad (28)$$

Вычислим интеграл $\oint_{\Gamma_1}$, где Γ_1 – окружность радиуса R .

Пусть

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_1 = \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \\ \beta &= \beta_1 = \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \\ \gamma &= \gamma_1 = -a \cdot \arctg \frac{y - y_0}{x - x_0}. \end{aligned} \quad (29)$$

Введем полярную систему координат

$$\begin{cases} x - x_0 = R \cos \varphi \\ y - y_0 = R \sin \varphi \end{cases} \quad (30),$$

тогда

$$\begin{cases} dx = -R \sin \varphi d\varphi \\ dy = R \cos \varphi d\varphi \end{cases}, \quad \alpha = \frac{\cos \varphi}{R}, \beta = \frac{\sin \varphi}{R}, \gamma = -a\varphi. \quad (31)$$

В результате вычислений при $R \rightarrow 0$ получим

$$\oint_{\Gamma_1} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = \pi u(x_0, y_0). \quad (32)$$

Аналогично при $\alpha = \alpha_2, \beta = \beta_2, \gamma = \gamma_2$

$$\oint_{\Gamma_1} \alpha u dy - (\alpha v + \gamma) dx = \pi v(x_0, y_0). \quad (33)$$

В результате из (14) имеем

$$\oint_{\Gamma_3} \alpha_1 u dy - (\alpha_1 v + \gamma_1) dx = \pi u(x_0, y_0), \quad (34)$$

$$\oint_{\Gamma_3} \alpha_2 u dy - (\alpha_2 v + \gamma_2) dx = \pi v(x_0, y_0). \quad (35)$$

Зададим кривую Γ_3 в параметрическом виде:

$$x = f(t), y = \varphi(t), 0 \leq t \leq T \quad (36),$$

$f'(t), \varphi'(t)$ соответственно производные функций $f(t)$ и $\varphi(t)$.

Тогда функции $u(x_0, y_0), v(x_0, y_0)$ из (28), (34) будут вычисляться по следующим формулам

$$\begin{aligned} u(x_0, y_0) &= \frac{1}{\pi} \int_0^T \left(\frac{(f(t) - x_0) \sqrt{(f'(t))^2 + (\varphi'(t))^2}}{\sqrt{(f(t) - x_0)^2 + (\varphi(t) - y_0)^2}} + \right. \\ &\quad \left. + af'(t) \arctg \frac{\varphi(t) - y_0}{f(t) - x_0} \right) dt, \\ v(x_0, y_0) &= \frac{1}{\pi} \int_0^T \left(\frac{(\varphi(t) - y_0) \sqrt{(f'(t))^2 + (\varphi'(t))^2}}{\sqrt{(f(t) - x_0)^2 + (\varphi(t) - y_0)^2}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{a}{2} f'(t) \ln((f(t) - x_0)^2 + (\varphi(t) - y_0)^2) \right) dt. \end{aligned} \quad (37)$$

Для получения этих соотношений использованы решения (34) и (35) соответственно.

Теперь вычисляем значение выражения

$$u^2 + v^2 \quad (38)$$

в точке (x_0, y_0) . Те точки, в которых (38) больше или равно единице, принадлежат пластической области, а те в которых выражение (38) меньше нуля – упругой.

На основе формул (34), (35) созданы программы, которые позволяют с любой точностью строить пластические и упругие области в скручиваемом стержне.

Решение тестовых задач показало хорошее совпадение с известными решениями.

Библиографические ссылки

1. Аннин Б. Д., Черепанов Г. П. Упруго-пластическая задача. Новосибирск : Наука.
2. Киряков П. П., Сенашов С. И., Яхно А. Н. Приложение симметрий и законов сохранения к решению дифференциальных уравнений. Новосибирск : Изд-во СО РАН.
3. Senashov S. I., Yachno A. N. Conservation Laws, Hodograph Transformation and Boundary Value Problems of Plane Plasticity. SIGMA 8 (2012), 071, 16 p.
4. Сенашов С. И. Законы сохранения в задаче о продольной плоской волне нагрузки в упругопластическом стержне // Вестник СибГАУ. 2011. № 3 (36). С. 82–85.

References

1. Annin B. D., Cherepanov G. P. *Uprugo-plasticheskaya zadacha* (Elastic-plastic problem). Novosibirsk, Nauka.
2. Kiryakov P. P., Senashov S. I., Yachno A. N. *Prilozhenie simmetriy i zakonov sohraneniya k resheniyu differentsialnykh uravneniy* (The application of symmetries and conservation laws for the solution of differential equations). Novosibirsk, Izd-vo SO RAN.
3. Senashov S. I., Yachno A. N. Conservation Laws, Hodograph Transformation and Boundary Value Problems of Plane Plasticity. SIGMA 8 (2012), 071, 16 p.
4. Senashov S. I. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 3 (36), p. 82–85.

© Сенашов С. И., Черепанова О. Н., Кондрин А. В., 2013

УДК 538.9

ВЛИЯНИЕ ФОТОННОЙ ОБРАБОТКИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОВОДИМОСТЬ In_2O_3 ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ АВТОВОЛНОВЫМ ОКИСЛЕНИЕМ*

И. А. Тамбасов¹, И. В. Немцев^{2, 4}, Д. С. Савранский³, А. А. Мацынин¹, Е. В. Ежикова⁴

¹Институт физики им. Л. В. Киренского, Сибирское отделение Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50, строение 38. E-mail: tambasov_igor@mail.ru

²Красноярский научный центр, Сибирское отделение Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50

³Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

⁴Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

Пленки оксида индия были синтезированы автоволновой реакцией окисления на покровном стекле, кварце и монокристалле MgO . Толщина пленки измерялась с помощью режима «cross-section» сканирующего электронного микроскопа и составляла ~300 нм. Оптическая ширина запрещенной зоны оксида индия была ~3.5 эВ. Исследования сопротивления In_2O_3 пленки от температуры в теневых условиях показали, что при нагревании до 100 °С сопротивление увеличивается на ~10 %. Показано, что при фотооблучении происходит резкое уменьшение электрического сопротивления пленок, максимальное изменение которого состав-

вило 52 % при комнатной температуре. Определены две скорости релаксации сопротивления пленок после прекращения облучения 15 Ом/сек первые 30 сек и 7 Ом/сек в остальное время. Сделано предположение, что фотовосстановление является доминирующим механизмом, ответственным за изменения проводимости пленок.

Ключевые слова: тонкие пленки, оксид индия, автоволновое окисление, ультрафиолетовое облучение

THE IMPACT OF THE PHOTON PROCESSING AND TEMPERATURE ON THE CONDUCTIVITY OF In_2O_3 FILMS PRODUCED WITH AUTOWAVE OXIDATION

I. A. Tambasov¹, I. V. Nemtsev^{2,4}, D. S. Savranskiy³, A. A. Matsynin¹, E. V. Ezhikova⁴

¹ Kirenskiy Institute of Physics of the SB RAS

50, building 38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: tambasov_igor@mail.ru

² Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS

50 Akademgorodok Krasnoyarsk, 660036, Russia.

³ Siberian Federal University

79 Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia.

⁴ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia

Indium oxide films were synthesized by auto-wave oxidation reaction on the cover glass, quartz and single crystal MgO. The film thickness was measured with a mode «cross-section» scanning electron microscope and was ~ 300 nm. Optical band gap of indium oxide was ~3.5 eV. The study of In_2O_3 film resistance versus temperature in the dark conditions showed that when heated to 100 °C the resistance increases by about 10 %. It is shown that the films electric resistance decreases sharply under photo radiation and the maximum change was 52 % at room temperature. The two film resistance relaxation rates after irradiation have been determined to be 15 Ohm/s the first 30 seconds and 7 Ohm/s for the rest, respectively. On the basis of the above stated the authors suggest that the photo reduction is the dominant mechanism responsible for the changes in conductivity of In_2O_3 films.

Keywords: thin films, indium oxide, auto-wave oxidation, ultraviolet irradiation

In_2O_3 является прямым широкозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны ~ 3.7 эВ [1]. Благодаря своим свойствам пропускать видимый свет и проводить электрический ток, оксид индия находит широкое применение в различных приложениях и устройствах. Тонкие пленки In_2O_3 используются в газовой сенсорике, тонкопленочных прозрачных транзисторах, плоских дисплеях, электрохромных устройствах, солнечных элементах и т. д. [2]. Легированные оловом In_2O_3 пленки используются в конструкционных материалах космических аппаратов для снижения уровня радиационной электризации [3].

В настоящее время развиваются низкотемпературные и простые методы получения In_2O_3 пленок [4; 5]. Среди этих методов предлагается способ получения металлооксидных пленок в режиме горения, который проходит при температурах ниже 200 °C [4].

В ряде работ было показано влияния ультрафиолетового (УФ) облучения на сопротивление пленок оксида индия [6]. В результате УФ облучения происходит резкое уменьшение сопротивления пленок оксида индия. После прекращения облучения, происходит медленное восстановление сопротивления. Количественное изменение сопротивления пленок In_2O_3 при облучении УФ светом сильно зависит от структуры и морфологии самой пленки [6; 7].

Представляют интерес для космического материаловедения исследования влияния температуры и фотооблучения на сопротивление In_2O_3 пленок, полученных различными методами.

В данной работе представлены результаты исследования комплексного воздействия температуры и фотонной обработки (спектральный диапазон 0.2–0.7 мкм) на сопротивление пленок оксида индия, полученных автоволновым окислением [5]. Представлены исследования релаксации электрического сопротивления.

Образцы и методика эксперимента. Пленки оксида индия получены реакцией автоволнового окисления, которая исследовалась нами ранее [5]. В качестве подложек были использованы покровное стекло, кварц и монокристалл MgO, которые предварительно химически очищались. Толщина пленки измерялась с помощью режима «cross-section» сканирующего электронного микроскопа Hitachi S5500.

Спектрофотометр Shimadzu UV-3600 был использован для определения оптической запрещенной зоны пленок оксида индия. Для этой цели мы изготовили пленку оксида на кварцевой подложке. Кварцевая подложка использовалась для того, чтобы избежать дополнительного поглощения в УФ диапазоне. Оптическую ширину запрещенной зоны определяли аналогичным образом, как описано в работе [8].

*Работа выполнена частично при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (госконтракт № 14.513.11.0023), а также Министерства образования и науки Российской Федерации (договор № 02.G25.31.0043).

В качестве источника света использовалась ртутная газоразрядная лампа сверхвысокого давления (Nikon mercury super high pressure lamp 100 w). Спектральное распределение излучения и мощность лампы измерялись спектрометром фирмы Ocean Optics HR 4000 и измерителем мощности Coherent FieldMax2-to, соответственно.

Измерение сопротивления образцов проводилось стандартным четырехзондовым методом. Термостат фирмы Spescas был использован при измерении сопротивления пленки оксида индия в диапазоне температур 25–100 °C и для поддержания заданной температуры во время облучения светом.

Экспериментальные результаты и обсуждение. На рис. 1 показано поперечное сечение пленки оксида индия на подложке MgO. Из рис. 1 видно, что толщина пленки составляет ~ 300 нм. Для пленок оксида индия, полученных автоволновым окислением, оптическая ширина запрещенной зоны была ~ 3.5 эВ (см. рис. 2).

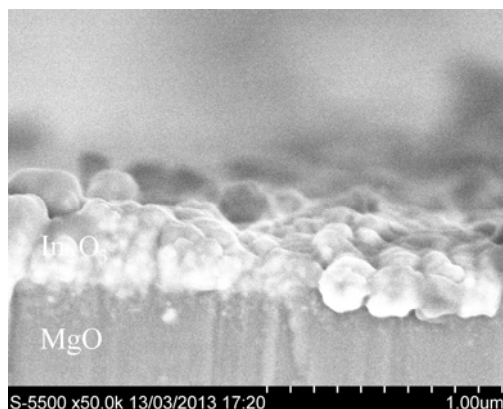


Рис. 1. Изображение поперечного сечения пленки оксида индия, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

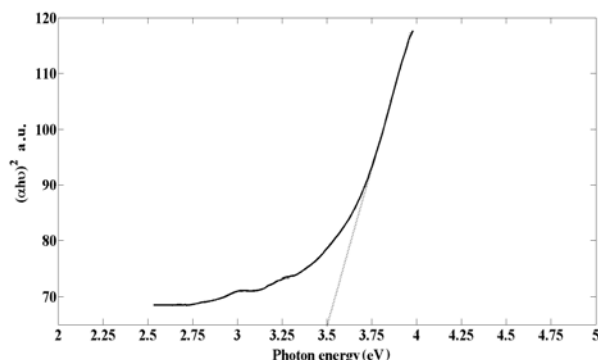


Рис. 2. Зависимость квадрата коэффициента поглощения от энергии падающего фотона для пленки оксида индия

На рис. 3 представлено спектральное распределение излучения ртутной газоразрядной лампы. Спектр излучения имеет типичные пики для паров ртути. Мощность излучения лампы составляла ~ 0.223 Ватт/см² в месте расположения образца. Из рисунка 4 видно, что сопротивление R пленки незначительно меняется (~ 10 %) от температуры в диапазоне 25–100 °C, где

R_0 – сопротивление пленки оксида индия, измеренного при комнатной температуре в отсутствии освещения.

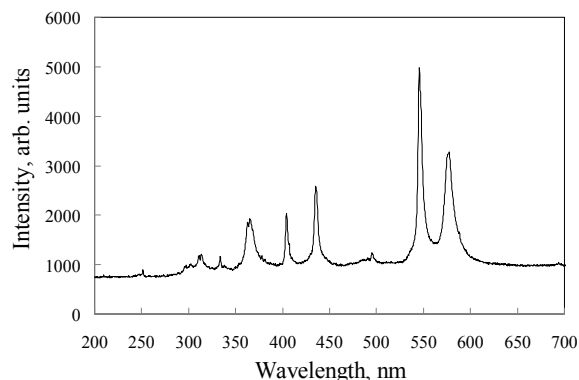


Рис. 3. Спектр ртутной газоразрядной лампы сверхвысокого давления, используемой для облучения пленок оксида индия

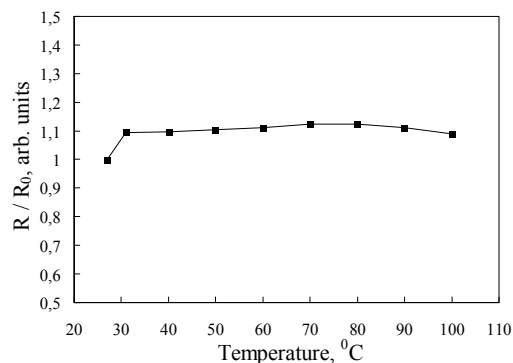


Рис. 4. Температурная зависимость электрического сопротивления пленки оксида индия в отсутствии освещения

Зависимость сопротивления пленки оксида индия от времени облучения светом и релаксация сопротивления при выключении лампы представлена на рис. 5. При включении лампы происходит резкое уменьшение сопротивления пленки на 52 %, предположительно, из-за генерации свободных носителей заряда и/или увеличения подвижности электронов за счет десорбции ионов кислорода с межзеренных границ [9].

После прекращения облучения наблюдалось релаксация сопротивления пленки оксида индия со скоростью 15 Ом/сек первые 30 секунд и 7 Ом/сек в последующее время.

В настоящее время существует несколько представлений о влиянии света на электрические свойства оксида индия [9]: генерация электронно – дырочных пар, десорбция кислородных адсорбатов, фотовосстановление (в английских источниках «photoreduction»). Ширина запрещенной зоны пленок оксида индия, в зависимости от способа приготовления, может иметь значение от 3.5 эВ (355 нм) до 4 эВ (310 нм) [10], что сопоставимо с полученной нами величиной равной

3.5 эВ. Поэтому, для перехода электрона с валентной зоны в зону проводимости, необходимо облучать пленки оксида индия светом с длиной волны ≤ 355 нм. В спектре ртутной газоразрядной лампы (см. рис. 3) длины волн ≤ 355 нм имеют малую интенсивность на уровне фона. Однако, большое количество поверхностных дефектов и межзеренных границ приводят к модификации зонной структуры оксида индия. Следовательно, переход электрона возможен и при энергиях света меньших, чем энергия запрещенной зоны [9; 11]. В результате данного перехода может образоваться электронно-дырочная пара. Однако при включении лампы мы не наблюдали резкого скачка в увеличение сопротивления пленки.

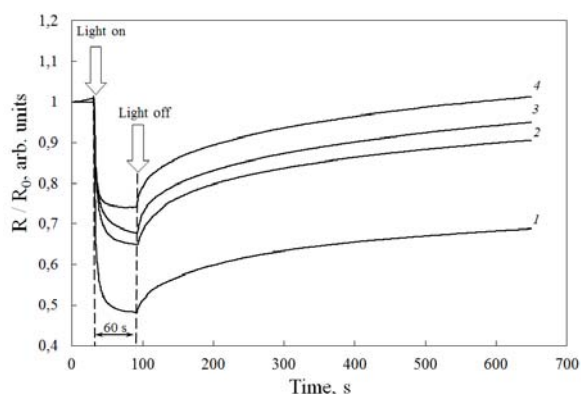


Рис. 5. Изменение сопротивления пленки оксида индия во время фотооблучения при температуре подложки, °C: 1 – 25; 2 – 40; 3 – 80; 4 – 100

Десорбция кислородных адсорбатов с поверхности пленки проводящих прозрачных оксидов во время облучения светом может увеличить подвижность носителей заряда и, следовательно, повысить проводимость пленки [12]. Данное влияние света на проводимость пленки оксида индия в нашем случае возможно, но оно не является доминирующим.

Механизм фотовосстановления заключается в том, что фотообразованная дырка рекомбинирует со связанным электроном в связи In – O. Это вызывает разрушение химической In – O связи, освобождает атома кислорода и его миграцию к поверхности пленки, где два атома кислорода образуют молекулу O₂, и происходит ее десорбция с поверхности. В конечном итоге в кристаллической структуре появляются дополнительные кислородные вакансии, которые являются источниками электрической проводимости в пленках оксида индия [13]. Поэтому мы предполагаем, что в наших исследованиях фотовосстановление является доминирующим механизмом влияния света на проводимость пленок оксида индия. Полученные результаты в данной работе могут быть использованы в технологиях изготовления тонкопленочных покрытий для обеспечения надежного функционирования космических аппаратов в условиях воздействия факторов космического пространства.

Пленки оксида индия были синтезированы автоволновой реакцией окисления. Оптическая ширина запрещенной зоны составляла ~ 3.5 эВ. Электрическое сопротивление пленок In₂O₃ слабо менялось ($\sim 10\%$) в диапазоне температур 25–100 °C.

Показано, что при облучении светом происходит резкое уменьшение электрического сопротивления (на 52 %) пленок оксида индия. При увеличении температуры во время облучения происходит уменьшение изменения сопротивления. После прекращения облучения пленки происходит релаксация сопротивления с двумя скоростями ~ 15 Ом/сек первые 30 секунд и ~ 7 Ом/сек в последующее время. Температура не влияла на скорости релаксации сопротивления.

Подтверждается предположение о генерации дополнительных носителей заряда за счет механизма фотовосстановления.

Результаты исследования эффекта фотооблучения могут быть использованы в технологиях изготовления тонкопленочных покрытий для обеспечения надежного функционирования космических аппаратов.

References

- Walsh A., Da Silva J. L. F., Wei S. H., Korber C., Klein A., Piper L. F. J., DeMasi A., Smith K. E., Panaccione G., Torelli P., Payne D. J., Bourlange A., Egdell R. G. *Physical Review Letters*. 2008, vol. 100, no. 16, pp. 167402.
- Granqvist C. G. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007, vol. 91, no. 17, pp. 1529–1598.
- Ciofalo M. R., Brady M. E., Panetta C. J., Meshishnek M. J. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2011, vol. 48, no. 6, pp. 931–941.
- Kim M. G., Kanatzidis M. G., Facchetti A., Marks T. J. *Nature Materials*. 2011, vol. 10, no. 5, pp. 382–388.
- Tambasov I. A., Myagkov V. G., Ivanenko A. A., Nemtsev I. V., Bykova L. E., Bondarenko G. N., Mihlin J. L., Maksimov I. A., Ivanov V. V., Balashov S. V., Karpenko D. S. *Semiconductors*. 2013, vol. 47, no. 4, pp. 569–573.
- Kiriakidis G., Moschovis K., Kortidis I., Binas V. *Vacuum*. 2012, vol. 86, no. 5, pp. 495–506.
- Olivier J., Servet B., Vergnolle M., Mosca M., Garry G. *Synthetic Metals*. 2001, vol. 122, no. 1, pp. 87–89.
- Kuznetsov V. L., O'Neil D. H., Pepper M., Edwards P. P. *Journal of Applied Physics*. 2011, vol. 110, no. 3, pp. 033702.
- Wagner T., Kohl C. D., Morandi S., Malagu C., Donato N., Latino M., Neri G., Tiemann M. *Chemistry-a European Journal*. 2012, vol. 18, no. 26, pp. 8216–8223.
- Han S. Y., Herman G. S., Chang C. H. *Journal of the American Chemical Society*. 2011, vol. 133, no. 14, pp. 5166–5169.
- Wagner T., Hennemann J., Kohl C. D., Tiemann M. *Thin Solid Films*. 2011, vol. 520, no. 3, pp. 918–921.
- Muraoka Y., Takubo N., Hiroi Z. *Journal of Applied Physics*. 2009, vol. 105, no. 10, pp. 103702.
- King P. D. C., Veal T. D. *Journal of Physics-Condensed Matter*. 2011, vol. 23, no. 33, pp. 334214.

УДК 621.331.221:681.526 (571.51)

РЕАЛИЗАЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ КОНТРОЛЯ И АВТОМАТИКИ

В. Г. Тарасов

Сибирский государственный технологический университет
Россия, Красноярск, просп. Мира, 82. E-mail: tarasovvg@mail.ru

Темой данной работы является раскрытие информации о практическом внедрении разрабатываемой системы автоматизации процессов технического обслуживания и ремонта оборудования средств автоматизации на энергетическом предприятии города Норильск. Результатом работы системы является оптимизация бизнес-процессов ТОиР цеха тепловой автоматики и измерений с целью сокращения времени для принятия управленческих решений и повышения их качества. Определяются требования к системе, показываются решаемые задачи, детально описывается конфигурация, состав и взаимодействие подсистем, сетевых устройств, разработанный интерфейс и способы доступа к данным. По результатам реализации функционала системы, можно увидеть и оценить ее возможности, экономическую целесообразность и возможные направления дальнейшего развития.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт оборудования, система планирования ресурсов предприятия, экспертная система.

REALIZATION OF THE LOCAL SYSTEM OF AUTOMATION OF MAINTENANCE PROCESSES AND REPAIR OF CONTROL AND AUTOMATION EQUIPMENT

V. G. Tarasov

Siberian State Technologies University
82 "Mira" prosp., Krasnoyarsk, Russia. E-mail: tarasovvg@mail.ru

The task of this work is to reveal the information on the practical implementation of the developed process of automation of maintenance system and repair of automation in the power plant of Norilsk city. The practical result of the system activity is the optimization of business processes, maintenance and repair of heating automatics and measurements, in order to reduce the time for decision-making and improve their quality. The author specifies the requirements to the system, shows the solvable problems, describes in details the configuration of the system, the composition and interaction of subsystems, network devices, designed interface and the way to access the data. According to the results of the system functionality realization, the reader can see and appreciate its features, cost-effectiveness and possible areas for further development of the system.

Keywords: equipment maintenance and repair, enterprise resource planning system, expert system.

В настоящий момент в отечественной энергетике сложилась ситуация, когда в процессах сервисного обслуживания оборудования автоматики и средств измерений на электростанциях, отсутствует накопление статистической информации о проведенных аварийных работах, отказов оборудования, дефектов и инцидентов.

Оперативная информация, фиксируется в оперативных журналах и журналах дефектов, журналах технических и административных распоряжений и т. д., но анализ возникновения неисправностей, качества выполнения ремонтов проводится бессистемно. А ведь на основании этих данных можно анализировать ошибки на разных стадиях управления, применить различные типов оборудования, оптимизировать материальные затраты и пр. Кроме того, не хватает оперативности информирования персонала при изменениях рабочих параметров, изменения эксплуата-

ционных схем, выполненных работ на объектах электростанции.

Учет хронологии выполнения работ слабо реализован в настоящий момент. Между тем, на основании хронологических данных, можно получать статистику по многим важным показателям предприятия. Например, отслеживание видов работ, которые проводились с прибором, датчиком или регулятором, сейчас требует значительных затрат времени, поскольку при этом необходимо обращение к бумажному архиву. Электронная статистика полезна для метрологов и экономистов, персонала обслуживающего данное оборудование, производственно-технического отдела предприятия. При проведении модернизации производства, эта информация может быть полезной при принятии решений о приобретении оборудования определенного типа. Появляется возможность сравнения материальных и трудовых затрат на обслуживание опреде-

ленного типа оборудования (затрат на приобретение, монтаж, эксплуатацию).

Накопление истории работы с оборудованием и оперативное обеспечение информацией о методике правильного выполнения работ полезны при принятии решений по организации проведения работ и при выборе методов устранения дефектов или выполнения ремонта. Такими данными может быть методика предложенная заводом-изготовителем или профессиональный опыт эксперта в этой области. Автоматическая выдача рекомендаций для принятия решения на основании анализа текущей ситуации и выполненных работ, в данный момент вообще не реализована.

С целью оптимизации процессов управления и обработки информации необходимой для принятия решений, сокращения времени при принятии решений о методе сервисного обслуживания и общего времени на выполнение работ, повышения качества выполнения обслуживания и безопасности обслуживающего персонала, надежности выполнения работ и снижения аварийности, ведется разработка и внедрение, автоматизированной информационной системы (АИС) автоматизирующей процессы управления техническим обслуживанием и ремонтом. Разрабатываемая система должна соответствовать определенным требованиям.

Система должна обеспечивать:

- 1) накопление информационной базы о состоянии оборудования и его истории, с целью оптимального выбора состава работ;
- 2) регистрацию отказов (дефектов, инцидентов);
- 3) учет всех проведенных работ;
- 4) информационное обеспечение персонала о методике и особенностях обслуживания типового оборудования предприятия;
- 5) работу с архивами технической документации;
- 6) формирование стратегических планов использования и графиков ремонта оборудования;

7) автоматизацию планирования ресурсов (трудовых и МТР) на сопровождение оборудования;

8) отражение оперативной информации, необходимой для принятия решений при проведении работ при ремонте ТО и для прогноза технического состояния оборудования;

9) отражение результатов фактического выполнения ремонтов и ТО;

10) анализ обеспеченности процесса сопровождения оборудования необходимыми ресурсами;

11) анализ отклонений в сроках и объемах выполнения ремонтов;

12) автоматизацию процессов паспортизации и аттестации оборудования.

После проведенной работы по исследованию и оптимизации бизнес-процессов сервисного обслуживания тепловой автоматики тепловых электростанций [1], принято решение о разработке программного комплекса состоящего из двух подсистем:

- 1) информационно-справочная служба систем контроля и автоматики (ИСС СКИА);
- 2) локальная система автоматизации технического обслуживания и ремонта (ЛСА ТОиР).

Структурная схема глобальных и локальных ресурсов системы изображена на рис. 1.

Обе подсистемы задействованы в процессе технического обслуживания и ремонта оборудования.

Локальная система автоматизации ЛСА ТОиР, обеспечивает автоматизацию производственных процессов управления на предприятии и решение других, локальных задач. Информационно-справочная служба ИСС СКИА, представляет собой электронную библиотеку, базу знаний, содержащую информацию о методиках и особенностях обслуживания определенного вида и типа оборудования. ИСС СКИА, обеспечивает информацией клиентов с различными производственными конфигурациями. Целью данной статьи является раскрытие информации о локальной системе автоматизации процессов ТОиР (ЛСА ТОиР).

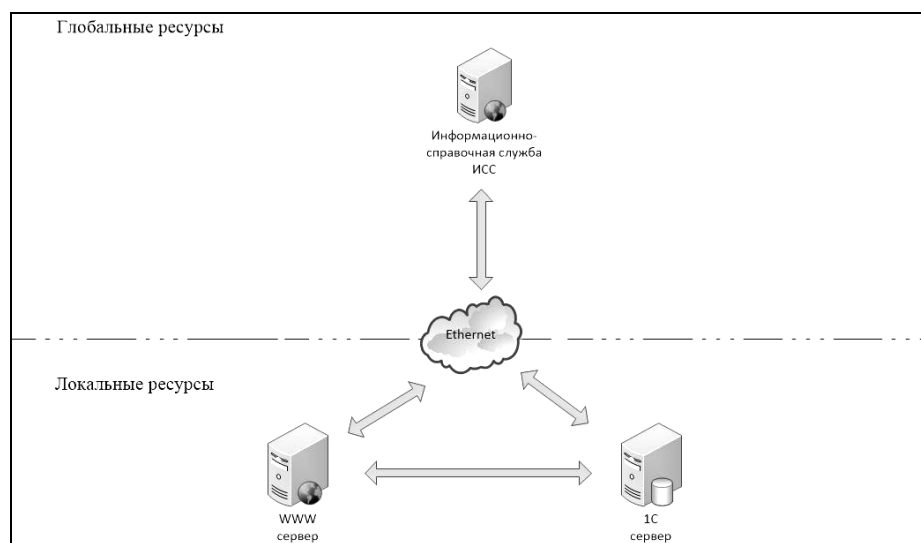


Рис. 1 Конфигурация подсистем АИС

3К-402 (Электропривод)

Записать и закрыть

Все действия

Позиция: 3К-402

Принадлежит объекту: Котел-3

Название: Питательная вода к СУП

Номер сборки: 301Н-2

Место в шкафу сборки: 3

Отметка установки привода: 121,0

Место установки: Ось 14 ряд В

Тип привода: Электродвигатель

ТО и ремонт электропривода

Мощность двигателя: 4 кВт

Ток затяжки: 2,5 А

Ток автомата питания: 10 А

Примечания:

Данные обновлены: 23.12.2012

Добавить

N	Дата	Наименование работы	Кто выполнил работу
1	15.05.2013 0:00:00	Снятие электродвигателя	Тарасов В.Г.
2	24.05.2013 0:00:00	Установка электродвигателя	Тарасов В.Г.
3	24.05.2013 0:00:00	Замена электродвигателя	Бушнин Г.А.

Все действия

Рис. 2. Форма работы со справочником «Электроарматура»

ЛСА ТООР, разрабатывается как конфигурация базы данных 1С-Предприятия размещенная на сервере 1С. На момент публикации этой статьи, реализованы и активно дорабатываются следующие функции из общего перечня функционала системы:

1. Паспортизация объектов электроарматуры и средств измерения (СИ).
2. Учет аттестации оборудования.
3. Учет фактического выполнения ремонтов и ТО.
4. Работа с архивами и технической документацией.

Паспортизация электроарматуры и средств измерений, отражение фактического выполнения аттестации, ремонтов и ТО.

Средствами программы 1С: Предприятие 8.2 [2], создан справочник «Электроарматура» и отредактирован интерфейс формы справочника. Форма справочника изображена на рис. 2.

Справочник «Электроарматура» позволяет сохранять и редактировать все необходимые данные различных типов электроарматуры – электрифицированных задвижек, регуляторов, соленоидов и других исполнительных механизмов обслуживаемых на ТЭЦ. Используя интерфейс формы справочника, пользователь системы может вести учет выполненных ремонтных работ и ТО, а так же других данных. По аналогии создания справочника «Электроарматура», создан справочник «Электронные приборы» в котором добавлена возможность вести учет выполненных поверок и калибровок электронных средств измерений. Так как электронные средства измерений в своем большинстве состоят из комплекта приборов (первичного и вторичного прибора), и каждый из них является отдельным устройством, предусмотрена возмож-

ность вести учет поверок и калибровок для каждого устройства используя общую форму учета комплекта.

На всех формах, размещены автоматически формируемые гиперссылки к базе знаний ИСС СКИА. Например, гиперссылка «ТО и ремонт электропривода» формы справочника «Электропривод» (рис. 2) в зависимости от типа электропривода обращается к разделу базы знаний, содержащему всю необходимую информацию для данного типа оборудования. В случае необходимости, как это сделано в справочнике «Электронные приборы», гиперссылка может формироваться с точностью до точной модификации прибора, датчика или иного оборудования занесенного в базу данных локальной системы автоматизации. Примером такой сформированной гиперссылки является, гиперссылка на веб-страницу онтологии базы знаний с внутренней ссылкой на документ, содержащий информацию о приборе типа ВМД: <http://ntek/Ontology/Devices/P/DfTr/Default.asp#ВМД>

При использовании автоматически сформированной прямой гиперссылки или запроса к системе, экономится значительное количество времени на поиск необходимой информации, так как документ, открытый из окна программы напрямую обращается к объекту онтологии базы знаний средств измерений и автоматике.

Работа с архивами и технической документацией. Работа с архивами и технической документацией выполнена в виде онтологии электронных схем и документов с доступом через интерфейс корпоративного сайта. Так как в каждом локальном предприятии, существует свой собственный набор необходимых схем и документов, то программа для работы с архи-

вами и технической документацией представляет собой локальный ресурс предприятия. Управление данными, производится системой управления контентом CMS. Доступ к данным возможен с использованием любого браузера. Предусмотрено автоматическое формирование гиперссылок на элементы справочника технической документации напрямую из форм справочников базы данных 1С. Окно работы с технической документацией изображено на рис. 3.

Используя данные системы работы с архивами, достигается оперативность информирования персонала при изменении эксплуатационных схем, значительно повышается удобство работы с документацией

и сокращается время на поиск и внесение изменений в существующие схемы и документы. Таким образом, повышается производительность и безопасность труда.

Конфигурация LAN и доступ к системе. Выполнен монтаж среднескоростной сетевой инфраструктуры LAN с возможностью доступа по технологии Wi-Fi. Взаимодействие устройств с системой происходит по клиент-серверной технологии. Это позволяет производить доступ к системе компьютерам и любому устройству поддерживающих Wi-Fi-технологии в районе помещений оперативных дежурных ЦТАИИ, БЩУ-1, ЦЩУ. Сетевая конфигурация ЛСА ТЭЦ-2 изображена на рис. 4.

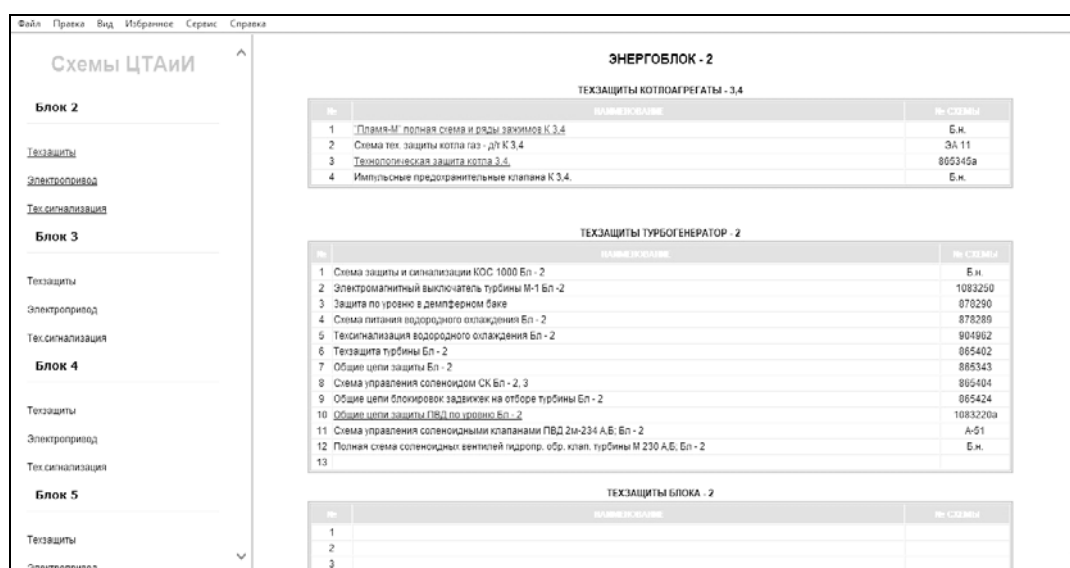


Рис. 3. Окно работы с технической документацией

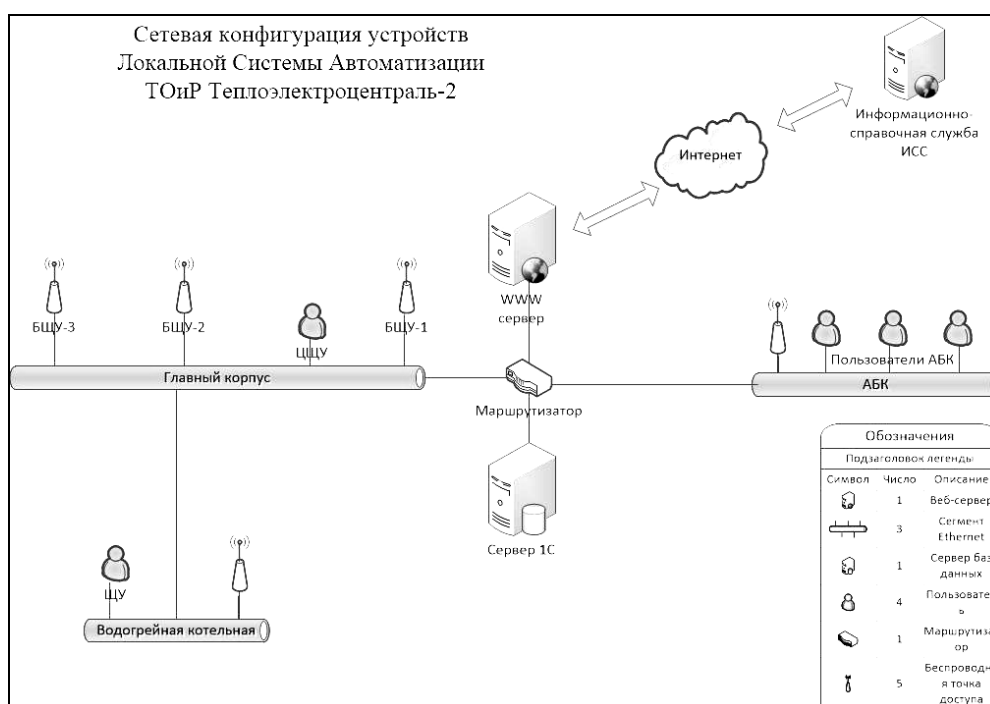


Рис. 4. Сетевая конфигурация ЛСА ТООР

На сетевом компьютере, установлена программа 1С с конфигурацией системы ТОиР и запущены службы веб-сервера.

Доступ к ресурсам ЛСА возможен следующими способами:

- информационная база расположена на сервере «1С: Предприятия». Используется тонким или толстым клиентом в клиент-серверном варианте.

- информационная база расположена на веб-сервере. Используется толстым клиентом и веб-клиентом в файловом или клиент-серверном варианте.

Таким образом, средствами программы «1С: Предприятие» разработана конфигурация локальной системы автоматизации процессов технического обслуживания и ремонта оборудования. В основу разработки системы, положена концепция разделения системы на локальную систему ЛСА ТОиР и общедоступные ресурсы информационной поддержки ИСС СКИА. Система разработана специально для нужд энергетических предприятий, что является одним из отличий системы от других систем на рынке ПО (например, систем класса «ТОРО» [3], «1С:ТОИР» [4], «Global EAM» [5]). Локальная система автоматизации, на основании уникального состава оборудования предприятия, выполняет операции только с оборудованием данного предприятия. Информационная поддержка для каждой единицы оборудования обеспечивается информационно-справочной службой ИСС СКИА. Данные подсистемы информационной поддержки ИСС СКИА, необходимы для правильной и безопасной эксплуатации объектов сервисного обслуживания.

Работа с ресурсами системы, возможна в клиент-серверном варианте используя программу 1С и с использованием веб-служб. Благодаря использованию одинакового алгоритма формирования ссылок и запросов к базе знаний, разработчики программного обеспечения имеют возможность использовать этот алгоритм в других системах автоматизации процессов.

С помощью разработанного решения можно выполнять паспортизацию и аттестацию оборудования, производить учет фактического выполнения ТО и ремонтов оборудования, а так же, работать с архивами и технической документацией.

При развитии системы, имеет смысл внедрения элементов экспертной системы, использующей хронологические данные, накопленные за время эксплуатации оборудования. Внесение и обновление информации в базу знаний, пересмотр информации экспертами, будет происходить в процессе эксплуатации оборудования. Система будет предоставлять рекомендации, советы и подсказки о правильности применения определенной методики ТОиР, стратегии предприятия в конкретный момент времени и с учетом текущей оперативной обстановки. Т. е. система будет содержать элементы экспертной системы смешанного типа [6].

Планируется организация информационного обмена между подобными базами знаний на предпри-

ятиях, обслуживающих подобное оборудование, в подобных условиях эксплуатации. Информация системы, оказывает помощь при принятии решения о замене изношенного оборудования или модернизации производства.

Для производителя оборудования, информация программного комплекса о реальной эксплуатации выпускаемой ими продукции, будет являться одной из уникальных для того что бы обеспечить канал обратной связи с потребителем, что является одним из важных инструментов при проведении маркетинговых исследований для достижения конкурентных преимуществ товара.

Библиографические ссылки

1. Тарасов В. Г. Исследование бизнес-процессов сервисного обслуживания тепловой автоматики тепловых электростанций на примере норильской ТЭЦ // Вестник СибГАУ. 2012. № 3 (43). С. 215–218.
2. Радченко М. Г., Хрусталева Е. Ю. 1С: Предприятие 8.2 Практическое пособие разработчика. Примеры и типовые приемы. М. : ООО «1С-Паблишинг», 2009. 872 с.: ил.
3. Сайт корпорации «Галактика». URL: <http://toro.galaktika.ru/> (дата обращения 24.05.2013).
4. Сайт компании «1С:Бухучет и Торговля», раздел 1С:ТОИР Управление ремонтами и обслуживанием оборудования. URL: http://www.1cbit.ru/1csoft/index.php?SECTION_ID=651 (дата обращения: 24.05.2013).
5. Сайт компании «Бизнес Технологии», Global EAM. URL: <http://global-eam.ru/> (дата обращения: 24.05.2013).
6. Джарратано Джозеф, Райли Гари Экспертные системы: принципы разработки и программирование : пер. с англ. М. : Вильямс, 2007. 1152 с. : ил. Парал. Тит. Англ. ISSN 978-5-8459-1156-8 (рус).

References

1. Tarasov V. G. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 3 (43), p. 215–218.
2. Radchenko M. G., Hrustaleva E. Ju. *1S: Predpriyatie 8.2 Prakticheskoe posobie razrabotchika. Primery i tipovye priemy*. Moscow, ООО «1S-Publishing», 2009, 872 p.: il.
3. Sayt korporatsii «Galaktika». Available at: <http://toro.galaktika.ru/> (accessed: 24.05.2013).
4. Sayt kompanii «1S:Bukhuchet i Torgovlya», razdel 1S:TOIR Upravlenie remontami i obsluzhivaniem oborudovaniya. Available at: http://www.1cbit.ru/1csoft/index.php?SECTION_ID=651 (accessed ya: 24.05.2013).
5. Sayt kompanii «Biznes Tekhnologii», Global EAM. Available at: <http://global-eam.ru/> (accessed: 24.05.2013).
6. Dzharratano Dzhozef, Rajli Gari. *Jekspertnye sistemy: principy razrabotki i programmirovaniye*. : Per. s angl. Moscow, ООО «Vil'jams», 2007, 1152 p. : il. – Paral. Tit. Anгл. ISSN 978-5-8459-1156-8 (rus).

РАЗДЕЛ
2

АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.396.669

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КООРДИНАТ ГРУППЫ ОБЪЕКТОВ

А. М. Алешечкин¹, Н. Н. Дыдаева¹, А. В. Кацура², В. М. Мусонов²

¹ Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28. E-mail: AAleshechkin@sfu-kras.ru

² Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: pnk-sibsau@mail.ru

В представленной статье рассмотрена задача исследования методов определения координат нескольких наземных объектов в локальной системе координат. Проведен расчет погрешностей местоопределения для угломерно-дальномерного, дальномерного и разностно-дальномерного методов. Проведено сравнение погрешностей для исследованных методов, в результате которого получено, что наиболее точным является дальномерный метод определения координат объектов, что не противоречит известным результатам. С целью уменьшения погрешностей определения места в дальномерном и разностно-дальномерном режимах, предложен выбор опорных станций, основанный на критерии минимума суммарного геометрического фактора, получаемого для других станций. Использование такой оптимизации обеспечивает уменьшение погрешностей определения координат остальных станций. Приведены результаты расчета и сравнения погрешностей в дальномерном и разностно-дальномерном режимах по сигналам 3 и 4 опорных станций, на основании которых сделан вывод о целесообразности увеличения числа опорных станций и оптимизации их выбора. Разработанные методы могут быть использованы в системах дистанционного определения координат объектов при выполнении транспортных перевозок, а также в разведке и добыче полезных ископаемых.

Ключевые слова: определение координат, дальномерный, разностно-дальномерный, режимы, угломерный, погрешности, моделирование, радионавигационные, пеленгационные.

STUDY OF THE METHODS FOR THE OBJECTS GROUP RELATIVE COORDINATES DETERMINATION

A. M. Aleshechkin¹, N. N. Dydaeva¹, A. V. Katsura², V. M. Musonov²

¹ Siberian Federal University

28 Kirenskiy str., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: AAleshechkin@sfu-kras.ru,

² Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: pnk-sibsau@mail.ru

The article considers the problem of research of methods of determination of the coordinates of several ground-based objects in the local coordinate system. The authors make calculations of the errors positioning for the angle-ranging, ranging and difference-ranging methods, along with the comparison of the errors for the studied methods, as a result of which it was defined that the most exact is the ranging method of the objects coordinates definition, that do not contradict the known results. In order to reduce positioning errors in ranging and difference-ranging modes, the authors offer an option of the reference stations, based on the criteria of the total geometric factor minimum, obtained for the other stations. Use of this optimization provides for decrease of the errors of other stations coordinates determination. The calculation results are presented, along with the result of comparison of the errors in ranging and difference-ranging modes on the signals of the 3 and 4 reference stations, on the basis of which the authors made the conclusion that it is necessary to increase the number of reference stations and optimize their choice. The developed methods can be used in the systems of remote objects coordinates determination in transportation, as well as in exploration and extraction of mineral resources.

Keywords: coordinates determination, ranging, difference-ranging, modes, azimuth, error, simulation, radio navigation, direction finding.

Для некоторых применений радионавигации представляет интерес определение относительных координат потребителей, характеризующих расположение взаимное объектов друг относительно друга. Такие задачи могут возникать, например, при определении координат пунктов приема и возбуждения сейсмиче-

ских сигналов во время разведки месторождений нефти и газа при использовании трехмерной сейсмической съемки на суше и на морских акваториях [1; 2], а также в системах управления добычей полезных ископаемых, где требуется знание координат мест выработки и вспомогательных объектов, работающих,

например, в открытых карьерах или на дражных полигонах [3–8].

Как правило, при выполнении взаимной координатной привязки объектов один из объектов назначается ведущим, относительно которого определяются координаты других объектов, оснащенных бортовыми станциями (БС). Полученные относительные координаты БС при необходимости могут быть пересчитаны в абсолютные, заданные в той или иной системе координат, требуемой при выполнении работ. Для реализации такого пересчета необходимо знание абсолютных координат центра используемой системы координат (СК), а также направления осей данной системы координат. Следует отметить, что при задании направления осей системы относительных координат по направлениям: ось $0x$ – на Север, ось $0y$ – на Восток, ось $0z$ – вниз может быть получена локальная система координат (ЛСК) [9], для которой известны формулы перехода в систему геоцентрических координат (ГЦСК) или в систему географических координат широта-долгота-высота [10].

Исходя из вида измеряемых значений радионавигационных параметров можно выделить несколько методов определения местоположения объектов: дальномерный, квазидальномерный, разностно-дальномерный, пеленгационный, суммарно-дальномерный, а также их комбинации [11].

В данной статье будут рассмотрены три метода определения относительных координат объектов: угломерно-дальномерный, дальномерный и разностно-дальномерный. При этом здесь и далее полагается, что задача решается на плоскости, т. е. значение вертикальной координаты для всех станций считается одинаковым. В случае необходимости, для учета разности высот антенн могут быть использованы методы редукции полученных координат на плоскость, используемые при решении задач в морских радионавигационных системах [13].

Для определения координат БС относительно одной опорной станции (ОС) являющейся ведущей опорной станцией, далее в материалах статьи обозначенная как ОС1, находящейся в центре ЛСК, наиболее простым является угломерно-дальномерный метод, поскольку координаты станций определяются относительно одного опорного навигационного пункта, координаты которого могут быть приняты нулевыми, т.е. ведущая опорная станция ОС1 будет находиться в начале координат ЛСК. Для решения задачи определения координат БС данным методом требуется измерение истинных пеленгов (азимуты) az_i с ОС1 к каждой БС, а также дальностей r_i между станциями. При этом значения координат каждой из БС определяются по формулам:

$$\begin{cases} x_i = R_i \cdot \cos(az_i) \\ y_i = R_i \cdot \sin(az_i) \end{cases}, \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, n$ – текущий номер БС; n – общее число БС; R_i – измеренная дальность от ОС1 до i -й БС; az_i –

измеренный азимут направления от ОС1 к i -й БС; x_i, y_i – неизвестные координаты i -й БС.

Следует отметить, что угломерно-дальномерный метод обладает известным из радиолокации недостатком, состоящим в том, что с увеличением расстояния от ОС1 возрастает погрешность определения координат объекта.

Уменьшение влияния указанного недостатка достигается за счет использования дальномерного метода определения координат объектов. Определение координат в дальномерном режиме работы РНС осуществляется путем решения системы нелинейных уравнений вида:

$$R_i = \sqrt{(x_{oci} - x)^2 + (y_{oci} - y)^2}, \quad (2)$$

где R_i – измеренные значения дальности от i -й ОС до БС; x_{oci}, y_{oci} – известные прямоугольные координаты i -й ОС; x, y – координаты БС, подлежащие определению.

Система уравнений (2) состоит из n уравнений (по числу принимаемых сигналов ОС) с двумя неизвестными, представляющими собой координаты БС на плоскости xOy . Поскольку в системе (2) содержится 2 неизвестных, то для ее однозначного решения следует измерить дальности минимум до 2-х ОС.

Следует отметить, что для рассматриваемого дальномерного метода определения координат БС станции в измерениях являются равноправными, т. е. БС измеряет дальности до всех ОС (ОС1, ОС2 и т. д.), число которых, как было указано выше, должно быть больше либо равно двум. При этом начало координат рассматриваемой локальной системы координат ЛСК находится в точке расположения антенны станции ОС1 и в этом смысле данная станция является ведущей как и в рассмотренном выше угломерно-дальномерном методе.

Другим методом определения координат БС, является разностно-дальномерный, в котором вычисляются разности между значениями задержек или фазовых сдвигов (ФС) сигналов, принятых от ведомых ОС (ОС2, ОС3 и т. д.) и сигналами ведущей опорной станции ОС1 [11, 12]. Система уравнений для определения координат объектов в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta R_i &= \sqrt{(x_{oci+1} - x)^2 + (y_{oci+1} - y)^2} + \\ &+ d_{i+1,1} - \sqrt{(x_{oc1} - x)^2 + (y_{oc1} - y)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, n-1$ – текущий номер измеренного значения разности дальностей; ΔR_i – i значение разности дальностей, $d_{i+1,1}$ – известное расстояние между ведущей ОС (ОС1) и ведомой $i+1$ -й ОС.

С целью моделирования методов и расчета погрешностей определения координат в рассмотренных выше режимах была задана взаимная расстановка станций, относительные координаты которых требовалось затем определить.

При моделировании были заданы следующие исходные данные:

- координаты первой станции, являющейся ведущей опорной (ОС1) для всех исследуемых режимов в ЛСК были заданы равными (0, 0), т. е. данная станция является центром используемой локальной системы координат;
- число БС в системе $n = 14$;
- максимально возможные расстояния между ОС1 и БС равны 5 км;
- значения азимутов от ОС1 до БС находятся в диапазоне 0–360°.

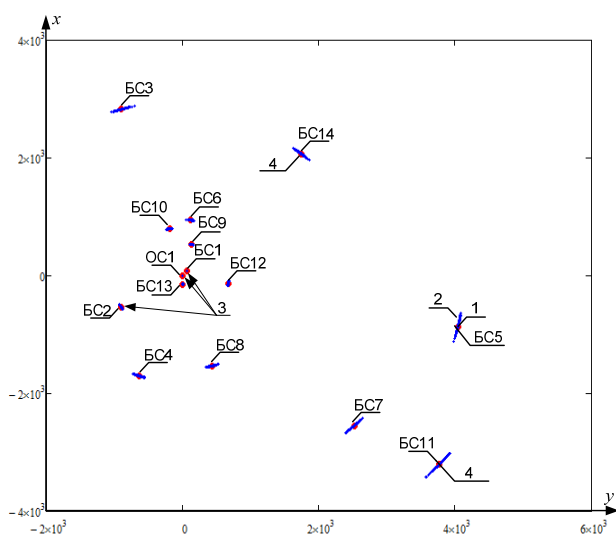
Полученная в результате расчетов расстановка ОС1 и БС приведена на рисунке. На данном рисунке обозначено положение бортовых станций БС1–БС14, а также опорной станции ОС1 в начале ЛСК.

Моделирование алгоритмов определения места станций в дальномерном и разностно-дальномерном методах осуществлялось по сигналам 3-х или 4-х ОС. При этом приведенная на рис. 1 расстановка ОС и БС сохранялась. В качестве других опорных станций (ОС2, ОС3 и т. д.) использовались станции, выбираемые из БС1–БС14. При этом в качестве ведущей опорной станции ОС1 всегда назначалась станция с координатами (0; 0).

Выбор остальных ОС (ОС2, ОС3 и т. д.) из числа БС осуществлялся двумя способами:

- случайный выбор, в котором в качестве опорных станций использовались первые 2 или 3 БС, в зависимости от требуемого числа ОС (3 или 4 соответственно);
- выбор с оптимизацией, в котором в качестве опорных выбирались БС, обеспечивающие минимальное значение суммарного геометрического фактора оставшихся станций, назначенных бортовыми [11; 12].

На рис. 1 в качестве примера показаны ОС, выбранные случайным образом (отмечены цифрой «3»), и с учетом оптимизации по минимуму геометрического фактора (отмечены цифрой «4»).



Заданные и измеренные в угломерно-дальномерном режиме значения координат БС

Из полученных результатов видно, что случайный выбор ОС привел к тому, что они оказались расположенными достаточно близко друг к другу и почти на одной прямой. Указанное расположение ОС является неоптимальным с точки зрения ожидаемой погрешности определения координат. В то же время, выбор в качестве ОС станций, обеспечивающих минимизацию суммарного геометрического фактора остальных станций, обеспечивает расстановку ОС на большом расстоянии друг от друга с наилучшим охватом рабочей зоны.

С целью сравнения исследованных методов определения места объектов осуществлялось их статистическое моделирование, при котором рассчитывались значения погрешностей определения координат БС при воздействии случайных погрешностей измерения азимутов и дальностей (угломерно-дальномерный режим), дальностей или разностей дальностей для дальномерного или разностно-дальномерного режимов соответственно. Погрешности измерения азимутов, дальностей и разностей дальностей задавались в виде нормально распределенных случайных величин с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением (СКО) погрешности измерения дальности или разности дальностей $\sigma_r = 1$ м, азимута $\sigma_{az} = 1^\circ$. Указанные значения погрешностей вполне достижимы современными дальномерными и радиопеленгационными системами на расстояниях между объектами в несколько километров [14].

На рисунке приведены результаты определения координат БС1–БС14, полученные угломерно-дальномерным методом. На приведенном рисунке цифрой «1» обозначены истинные значения координат БС, цифрой «2» – координаты, полученные при моделировании по 500 независимым испытаниям.

Из приведенных результатов следует, что, как и ожидалось, для рассмотренного угломерно-дальномерного режима, с увеличением расстояния от ОС разброс значений получаемых координат БС увеличивается, что объясняется возрастанием влияния погрешности определения направления прихода σ_{az} .

Среднеквадратические отклонения погрешностей определения координат БС определялись по результатам 500 независимых испытаний по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_{xi} &= \sqrt{\frac{1}{z} \cdot \sum_{j=1}^z (x_{ij} - x_{0i})^2}, \\ \sigma_{yi} &= \sqrt{\frac{1}{z} \cdot \sum_{j=1}^z (y_{ij} - y_{0i})^2}\end{aligned}\quad (4)$$

где $j = 1, \dots, z$ – текущий номер испытания; z – общее число проведенных испытаний; x_{ij}, y_{ij} – координаты i -й БС, полученные в j -м испытании; x_{0i}, y_{0i} – истинные значения координат i -й БС, заданные в соответствии с их расстановкой; σ_{xi}, σ_{yi} – СКО погрешности определения координат (x, y) i -й БС.

Значения среднеквадратических погрешностей определения места станций для исследованных методов определения координат объектов

Станция	Угломерно-дальномерный метод	Дальномерный метод		Разностно-дальномерный метод	
		3 ОС	4 ОС	3 ОС	4 ОС
ОС1	0	0	0	0	0
БС1	2.15	1.21	1.01	1.23	1.1
БС2	17.97	1.35	1.18	0	5.68
БС3	51.2	1.49	1.55	6.88	7.92
БС4	31.02	1.21	1.04	8.09	4.34
БС5	70.62	1.25	0	1.64	0
БС6	16.34	1.14	0.98	2.1	1.58
БС7	63.1	1.71	1.02	2.02	1.24
БС8	27.48	1.28	0.98	2.28	1.89
БС9	9.52	1.2	0.96	1.65	1.32
БС10	14.72	1.19	1.04	3.32	2.2
БС11	80.5	0	0	0	0
БС12	12.47	1.18	1.08	1.03	0.95
БС13	2.53	1.26	1.03	2.21	2
БС14	48.2	0	0	0	0

Результирующая погрешность определения места i -й БС σ_i вычислялась следующим образом:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{xi}^2 + \sigma_{yi}^2}. \quad (5)$$

В таблице приведены результаты расчета погрешностей определения координат БС σ_i при выборе оптимального размещения станций по минимуму геометрического фактора их расстановки.

В данной таблице в первой колонке приведены названия станций в соответствии с обозначениями рисунка. Значения нулей, приведенные в строках значений погрешностей означают, что в данном режиме станция использовалась в качестве ОС и ее координаты не определялись.

Таким образом, полученные значения погрешностей показывают, что наиболее точным является дальномерный метод с выбором ОС из числа имеющихся станций по критерию минимума суммарного геометрического фактора остальных станций. Вместе с тем перед применением дальномерного метода целесообразно использовать угломерно-дальномерный метод для получения приблизительной оценки места всех станций. Затем необходимо выбрать из имеющихся станций, станции, назначаемые в качестве опорных (ОС1, ОС2, и т. д.) и осуществить определение координат данных станций с высокой точностью, после чего система переходит в штатный дальномерный режим определения координат объектов.

В случае необходимости обслуживания неограниченного числа объектов, либо при отсутствии возможности временной синхронизации сигналов всех станций, система может работать в разностно-дальномерном режиме. В этом режиме сигналы излучают станции, выбранные в качестве ОС, а БС рабо-

тают только в режиме пассивного приема сигналов. В данном методе уменьшение погрешностей достигается также за счет оптимизации выбора положения станций, назначаемых в качестве ОС по критерию минимума суммарного геометрического фактора для остальных станций, не назначенных ОС.

Исследованные методы определения относительных координат объектов могут найти применение в системах координатной привязки нескольких объектов относительно друг друга при выполнении транспортных перевозок, а также при разведке и добыче полезных ископаемых, где существует потребность в определении координат объектов, участвующих в проведении такого рода работ. В качестве прототипа таких систем может быть использована РНС «Крабик» выпускаемая серийно ОАО «НПП «Радиосвязь» г. Красноярск [3;14].

Библиографические ссылки

1. Morgan J. G. Positioning challenges in marine 3-D seismic surveys // Ocean Industry. 1992. Vol. 27, № 1. P. 53–56.
2. Экспериментальные работы на реках Бирюса и Чуна по координатно-временной привязке водных вариантов импульсного невзрывного источника «Енисей» с использованием РНС ГЛОНАСС/GPS / А. М. Алешечкин, М. М. Валиханов, В. И. Кокорин и др. // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. № 2. С. 39–41.
3. Алешечкин А. М., Кокорин В. И. Радионавигационная система для определения точных координат акваториальных геологоразведочных и горных выработок // Маркшейдерский вестник. 2003. № 2. С. 54–57.
4. Алешечкин А. М., Кокорин В. И. Автоматизированный комплекс управления разработкой откры-

тых карьерных выработок // Инновационное развитие регионов Сибири : материалы Межрегиональной науч.-практ. конф. : В 2 ч. Ч. 1. Красноярск : ИПЦ КГТУ. 2006. С. 239–241.

5. Алешечкин А. М., Кокорин В. И. Система управления дражным полигоном // Инновационное развитие регионов Сибири : материалы Межрегиональной науч.-практ. конф. : В 2 ч. Ч. 1. Красноярск : ИПЦ КГТУ. 2006. С. 242–246.

6. Пат. РФ № 2152049. МПК⁷ G 01 S 5/02. Устройство для определения координат исполнительного механизма надводного объекта / А. М. Алешечкин, В. И. Кокорин ; заявитель и патентообладатель Красноярский гос. техн. ун-т. № 99107700/09 ; заявл. 07.04.1999 ; опубл. 27.06.2000, Бюл. № 18. 16 с.

7. Алешечкин А. М., Кокорин В. И. Использование спутниковых навигационных систем при разработке россыпей драгами // Маркшейдерский вестник. 1996. № 2. С. 20–22.

8. Алешечкин А. М., Валиханов М. М., Кокорин В. И. Применение спутниковых навигационных технологий при добыче полезных ископаемых // Вестник Хакасского технического института – филиала ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». 2007. № 24. С. 360–365.

9. Алешечкин А. М. Алгоритм геодезической привязки аэрофотоснимков // Вестник СибГАУ. 2011. № 7 (40). С. 58–62.

10. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems. London, Artech House, 2007. 523 p.

11. Алешечкин А. М., Бондаренко В. Н., Кокорин В. И. Радионавигационные системы : учеб. пособие : в 2 ч. Ч. 1. Основы теории и принципы построения радионавигационных систем // Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2003. 79 с.

12. Кокорин В. И. Радионавигационные системы и устройства : учеб. пособие. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. 175 с.

13. Инструкция по навигационно-гидрографическому и геодезическому обеспечению морских геологоразведочных работ (ИНГГО-86) // Министерство геологии СССР. М., 1986.

14. Алешечкин А. М. Метрологическое обеспечение высокоточной радионавигационной системы УВЧ-диапазона // Датчики и системы. 2011. № 3. С. 45–48.

References

1. Morgan, J. G. Positioning challenges in marine 3-D seismic surveys. *Ocean Industry*. 1992. Vol. 27, № 1. P. 53–56.

2. Aleshechkin A. M., Valikhanov M. M., Kokorin V. I., Fateev Yu. L., Shajdurov G. Ya. *Pribory i sistemy razvedochnoj geofiziki*. 2010. № 2. P. 39–41.

3. Aleshechkin A. M., Kokorin V. I. *Markshejderskij vestnik*. 2003. № 2. P. 54–57.

4. Aleshechkin A. M., Kokorin V. I. *Innovatsionnoe razvitie regionov Sibiri. Materialy Meghregional'noj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Ch. 1*. Krasnoyarsk, IPZ KGTU. 2006. P. 239–241.

5. Aleshechkin A. M., Kokorin V. I. *Innovatsionnoe razvitie regionov Sibiri. Materialy Meghregional'noj nauchno-prakticheskoy konferentsii, Ch. 1*. Krasnoyarsk, IPZ KGTU. 2006. P. 242–246.

6. Patent 2152049 Russian Federation, МПК⁷ G 01 S 5/02. *Ustrojstvo dlya opredeleniya koordinat ispolnitel'nogo mekhanizma nadvodnogo objekta*. A. M. Aleshechkin, V. I. Kokorin ; *zayavitel' i patentoobladatel'* Krasnoyarskij gos. tech. un-t. № 99107700/09 ; *zayavl.* 07.04.1999 ; *opubl.* 27.06.2000, *Bul.* № 18. 16 p.

7. Aleshechkin A. M., Kokorin V. I. *Markshejderskij Vestnik*. 1996. № 2. P. 20–22.

8. Aleshechkin A. M., Valikhanov M. M., Kokorin V. I. *Vestnik Khakasskogo tekhnicheskogo instituta – filiala FGOU VPO "Sibirskij Federal'nyj Universitet"*. 2007. № 24. P. 360–365.

9. Aleshechkin A. M. *Vestnik SibGAU*. 2011. № 7 (40). P. 58–62.

10. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems. London, Artech House, 2007. 523 p.

11. Aleshechkin A. M., Bondarenko V. N., Kokorin V. I. *Radionavigatsionnye sistemy. Ucheb. Posobie. Ch. 1. Osnovy teorii i printsipy postoeniya radionavigatsionnykh*. Krasnoyarsk, IPTS KGTU. 2003. 79 p.

12. *Istruksiya po navigatsionno-gidrograficheskomy i geodezicheskomy obestecheniyu morskikh geologorazvedochnyh rabot (INGGO-86)* // Ministerstvo geologii USSR. Moskva, 1986.

13. Aleshechkin A. M. *Datchiki i sistemy*. 2011. № 3. P. 45–48.

УДК 536.24:517.9

**ВЛИЯНИЕ ЗАКАЛКИ НА ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ДЕТАЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ***

А. С. Бачурин, К. Н. Бобин, К. А. Матвеев, Н. В. Курлаев

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

Проведено численное моделирование процесса закалки с учетом эффекта погружения методом конечных элементов. Моделирование производилось с учетом температурной зависимости характеристик материала и коэффициента конвективного теплообмена. Были получены распределения тепловых полей и напряжений в заготовке в процессе погружения и охлаждения в закалочной среде, распределения остаточных закалочных напряжений и деформаций после закалки. Установлено влияние направления погружения заготовок в закалочную среду на характер и величину образующихся остаточных напряжений. Для подтверждения результатов численного моделирования была проведена серия натурных экспериментов. Результаты, полученные при проведении экспериментов, хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

Ключевые слова: численное моделирование, закалка, остаточные напряжения, остаточные деформации.

RESIDUAL DEFORMATION OF AIRCRAFTS ALUMINUM PARTS AT HARDENING

A. S. Bachurin, K. N. Bobin, K. A. Matveev, N. V. Kurlaev

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marks prosp., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

The computational modeling of the hardening process with the account of the effect of submersion was carried out. The modeling was performed with the account of temperature dependence of the material characteristics and the convective heat transfer coefficient. For stability of the numerical solutions with high gradients it was used the relation between the time step, thermal diffusivity and the characteristic size of the grid. There were received the distributions of thermal fields and stresses in the workpiece in the process of submersion and cooling in hardening medium, distribution of the residual hardening stress and deformation after hardening. The influence of the submersion direction of work parts in hardening medium on mode and value of the residual stress was revealed. To proof the results of the computational modeling, the series of the full-scale experiments was held. The experimental results appeared to be in good agreement with theoretical calculations.

Keywords: FEA, hardening, residual stress, residual deformation

Закалка является неотъемлемой операцией при производстве многих деталей летательных аппаратов. Учитывая конструктивные особенности авиационных деталей их можно отнести к деталям средней и малой жесткости [1]. При закалке деталей малой жесткости в виду неравномерности охлаждения и наличия фазовых переходов в материале деталей возникают значительные напряжения, которые могут превышать предел текучести и приводить к образованию остаточных деформаций [1–4]. В связи с этим возникает необходимость оценки уровня остаточных деформаций, появляющихся после закалки.

При закалке деталь должна пройти процесс погружения, который осуществляется с конечной скоростью, а не мгновенно [5]. Процесс погружения может оказывать существенное влияние на образование и распределение напряжений в ходе погружения, а значит и на остаточные напряжения и деформации. Для оценки

влияния погружения на остаточные деформации моделировалась закалка стержневого образца с сечением прямоугольной формы, со средней жесткостью [1].

Постановка задачи численного моделирования: размеры стержня – длина $L = 200$ мм, высота $H = 41$ мм, ширина $A = 18$ мм (рис. 1), температура нагрева стержня 515°C , температура закалочной среды 27°C , закалочная среда – вода. Расчет производился в двух вариантах:

- 1) погружение вдоль размера H – далее «моделирование № 1»;
- 2) погружение вдоль размера A – далее «моделирование № 2».

Решение задачи производилось в плоской постановке с использованием симметрии.

При закалке многие характеристики, как металла, так и закалочной среды, влияют на скорость охлаждения и изменяются нелинейно.

*Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта Министерства образования и науки РФ №7.822.2011.

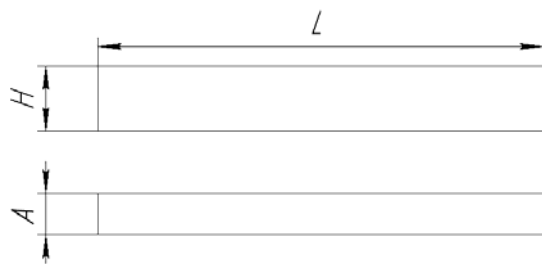


Рис. 1. Эскиз стержня, А-А сечение в котором представлены результаты

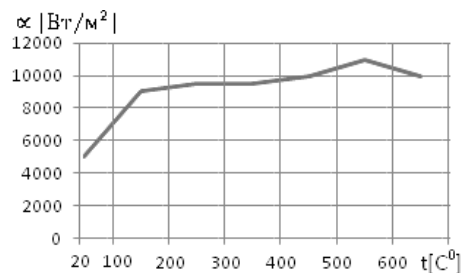


Рис. 2. График зависимости коэффициента конвективного теплообмена α от температуры поверхности теплообмена [7]

Поэтому при численном моделировании для получения достоверных результатов необходимо учитывать нелинейность характеристик материала и коэффициента теплообмена детали с водой, зависящих от температуры. На рис. 2 представлен график зависимости коэффициента теплообмена α , поверхности образца с водой, от температуры, который использовался для численного моделирования [6; 7].

Численное решение задачи было выполнено в программном комплексе Ansys. Решение проводилось в два этапа. Первый этап включал решение нестационарной тепловой задачи, второй – решение квазистационарной структурной задачи.

Так как для решения структурной задачи и учета погружения было необходимо получить распределение температурных полей начиная с первого момента касания образца с закалочной средой и до момента его полного погружения, то авторы написали макрос для среды Ansys, который изменял параметры конвективного теплообмена на поверхности образца в зависимости от времени, координаты и температуры. Погружение в моделировании № 1 происходило в течение 0,6 с, а погружение в моделировании № 2 – 0,4 с. Так как требовалось решение задачи с большими температурными градиентами, то для обеспечения устойчивости численного метода использовались соотношения:

$$ITS = \frac{\Delta^2}{4 \cdot \alpha}, \quad \alpha = \frac{k}{\rho \cdot C},$$

где Δ^2 приведенная длина конечного элемента в направлении наибольшего температурного градиента; k – коэффициент теплоотдачи; ρ – плотность; C – теплопроводность; ITS – начальный шаг по времени. Так как погружение в закалочную среду происходит в течение короткого времени и для структурного анализа необходимы поля распределения температуры в ходе погружения, то был назначен начальный шаг по времени много меньший общего времени погружения и равный 0,01 с. С учетом выбранного шага по времени и используя ранее приведенные соотношения вычислялась длина конечного элемента по направлению наибольшего температурного градиента. Используя полученное значение длины элемента, строилась сетка с наименьшим размером по направлению к центру образца и укрупнялась по мере удаления от границы образца.

На рис. 3 показано распределение температуры для моделирования № 2 в различные моменты времени. Полученные данные говорят о возможности возникновения значительных термических напряжений из-за большого различия в температуре части образца уже находящейся в контакте с закалочной средой от части еще не погружившейся. Термические напряжения могут превысить предел текучести материала, который из-за повышенной температуры снижен относительно значения $\sigma_T = 378$ МПа при 25 °С, вследствие чего могут произойти пластические деформации. Для подтверждения этого проводился структурный анализ, в котором в качестве нагрузки использовались данные теплового анализа – распределение тепловых полей и их изменение с течением времени. В тепловом анализе, как и в структурном, использовались характеристики материала, зависящие от температуры. Для учета эффекта погружения в квазистационарный структурный анализ загружались результаты теплового анализа с шагом 0,01 с.

После решения структурной задачи были получены распределения эквивалентных напряжений, они представлены на рис. 4. Анализируя распределение и изменение эквивалентных напряжений можно сделать вывод об однозначном влиянии погружения стержня в закалочную среду на образование остаточных деформаций.

Анализируя перемещения стержня после закалки (рис. 5) видно, что образец изогнулся в направлении погружения, что качественно подтверждается на практике, а так же упоминается в источниках [2; 3]. Проанализировав эпюры нормальных напряжений, представленных на рис. 6, можно заметить, что из-за быстрого охлаждения материал внешних слоев быстро уменьшается в объеме. Внутренняя же зона охлаждается замедленно и потому препятствует сжатию внешнего слоя. В результате внутренняя зона металла оказывается сжатой, а наружная – растянутой. В последующий период внутренняя зона, охлаждаясь, уменьшается в объеме и тянет к центру наружный слой. Но металл снаружи уже остыл и потому утратил пластичность. Поэтому в заключительный период охлаждения в наружных слоях металла возникнут сжимающие напряжения. Внутренняя же зона металла, будучи связанной с наружными слоями, не сможет уменьшиться в объеме, хотя и будет стремиться к этому. В результате в ней возникают внутренние растягивающие напряжения [4].

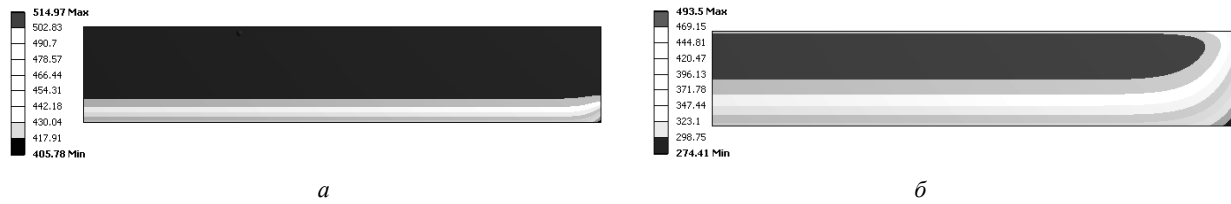


Рис. 3. Распределение температур ($^{\circ}\text{C}$) в стержне для моделирования № 2 в различные моменты времени при погружении в закалочную среду: $a - 0,03$ с; $b - 0,4$ с

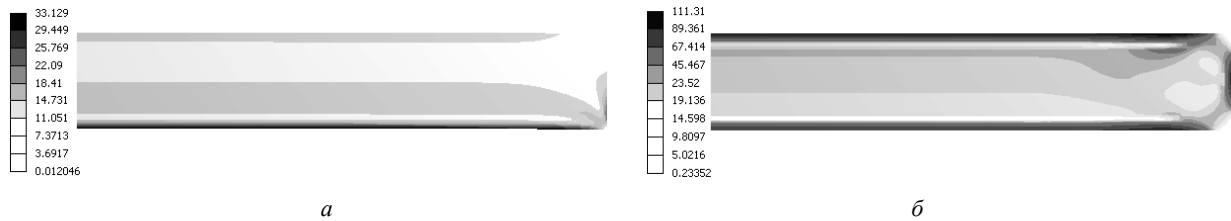


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений (МПа) для моделирования № 2 в стержне в различные моменты времени: $a - 0,03$ с; $b - 0,4$ с



Рис. 5. Перемещения (мм), возникшие в результате закалки (контуром показана недеформированная модель, масштаб увеличен для наглядности)

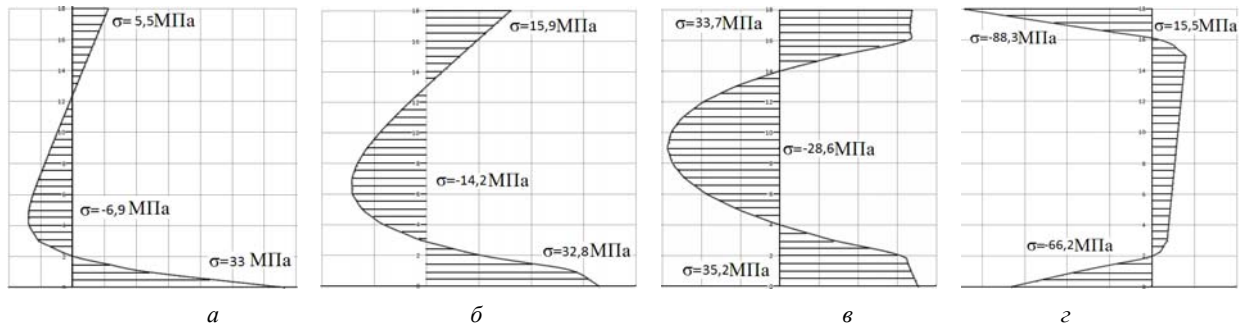


Рис. 6. Эпюры нормальных напряжений σ (МПа) в сечении $A-H$ по оси симметрии стержня в различные моменты времени для моделирования № 2: $a - 0,03$ с; $b - 0,13$ с; $v - 0,4$ с; z – деталь после завершения процесса охлаждения

Для оценки достоверности результатов численного моделирования была проведена серия натурных экспериментов по закалке. Условия проведения эксперимента: температура нагрева стержня 515°C , выдержка в печи 60 минут, температура закалочной среды 27°C , закалочная среда – вода. Образцы были изготовлены на ЧПУ станке из поковок материала АК6 в состоянии поставки Т1. Для изготовления образцов использовался материал из 4-х различных поковок. Для измерения изменения формы образцов на них наноси-

лась сетка. Сетка наносилась механически с помощью чертилки на предварительно отшлифованную грань образца (рис. 7). Измерение размеров сетки производилось с помощью оптического микроскопа Nikon MM-400.

Закалка образцов осуществлялась по двум схемам, с погружением вдоль стороны $H = 41$ мм (эксперимент № 1, 8 образцов) и вдоль стороны $A = 18$ мм (эксперимент № 2, 12 образцов). После закалки сетка, нанесенная на образцах, повторно измерялась и опре-

делялась величина перемещений узловых точек сетки. Измерения производились в течение 4-х часов непосредственно после закалки, чтобы исключить возможность влияния естественного старения на результаты эксперимента. Затем полученные экспериментальные данные обрабатывались с использованием вероятностно-статистической методики. Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента представлено на рис. 8.

Как видно из рис. 8 и рис. 6, *а* характер остаточных закалочных «деформаций», полученный числен-

ным моделированием, качественно аналогичен наблюдаемым на практике. Количественно результаты численного эксперимента так же хорошо согласуются с натурным экспериментом. Максимальная достигнутая относительная погрешность составила 23 %, минимальная 4,6 % (рис. 9). Однако, там где относительная погрешность достигала 23 %, абсолютная погрешность не была более 0,01 мм. Стоит отметить, что большая погрешность наблюдалась в эксперименте № 1, то есть при погружении в направлении большей жесткости.

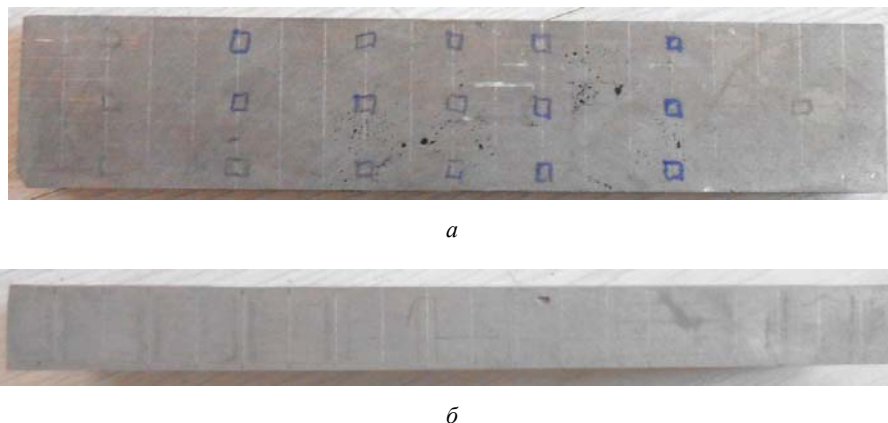


Рис. 7. Общий вид образцов с нанесенной сеткой: *а* – для погружения вдоль $H = 41$ мм; *б* – для погружения вдоль $A = 18$ мм

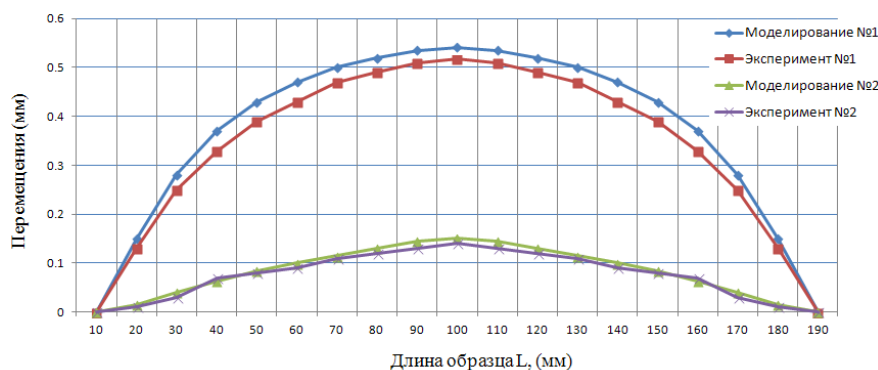


Рис. 8. График изменения перемещений по длине образца

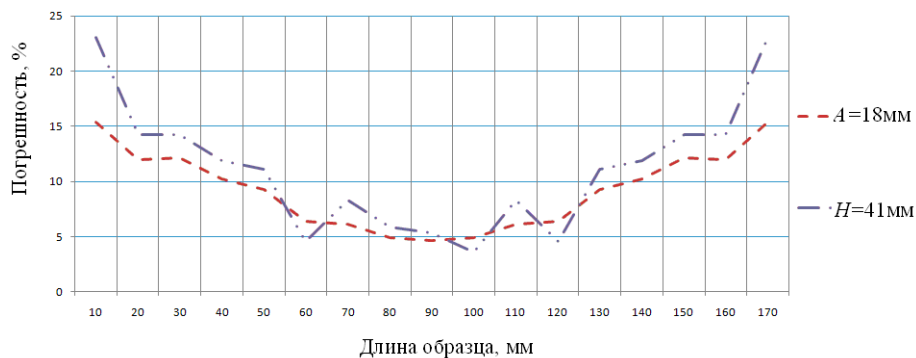


Рис. 9. График изменения относительной погрешности моделирования по длине образца

Таким образом, были достигнуты следующие результаты:

1. Впервые проведено численное моделирование закалки с учетом нелинейности поведения материала и эффекта погружения детали в воду, позволяющее оценивать характер и величину остаточных термических напряжений деталей летательных аппаратов средней и малой жесткости.

2. Численное моделирование показало процесс развития образования напряжений и деформаций во времени, начиная с первых моментов погружения.

3. Установлено влияние направления погружения в закалочную среду при закалке стержней с прямоугольным сечением на характер и величину образующихся остаточных напряжений. Погружение вдоль направления большей жесткости ведет к меньшим остаточным деформациям.

Библиографические ссылки

1. Перебоева А. А. Технология термической обработки металлов : курс лекций. Красноярск : СФУ, 2007. 143 с.
2. Арендарчук А. В., Астафьев А. А., Башнин Ю. А. Термическая обработка в машиностроении : справочник. М. : Машиностроение, 1980. 776 с.
3. Райцес В. Б. Термическая обработка на металлургических заводах. М. : Металлургия, 1971. 248 с.
4. Покровский А. М. Расчет остаточных напряжений в биметаллических опорных прокатных валках после термической обработки // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. С. 186–196.
5. Вопросы закалочного охлаждения. М. : Изд-во «Московский дом научно-технической пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского», 1969. 99 с.

6. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен : учеб. пособие для вузов. М. : Изд-во МЭИ, 2005. 550 с.

7. Применение SYSWELD для моделирования закалки в 2D постановке | Делкам – Урал [Электронный ресурс]. URL: http://plmural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki/ (дата обращения 16.06.2013).

References

1. Pereboeva A. A. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki metallov. Kurs lektsiy* (Heat Treatment Technology of Metals. Course of Lectures). Krasnoyarsk, SFU, 2007, 143 p.
2. Arendarchuk A. V., Astafiev A. A., Bashnin YU. A. *Termicheskaya obrabotka v mashinostroenii: Spravochnik* (Heat Treatment in Machine Building: Reference Book). Moscow, Nauka, 1987, 776 p.
3. Raytses V. B. *Termicheskaya obrabotka na metallurgicheskikh zavodakh* (Heat Treatment at Metallurgical Works). Moscow, Metallurgiya, 1971, 248 p.
4. Pokrovskiy A. M. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie»*, 2012, p. 186–196.
5. *Voprosy zakalochnogo ohlazhdeniya* (Problems of Hardening Cooling). Moscow, Moskovskij dom nauchno-tehnicheskoy propagandy im. F. Je. Dzerzhinskogo, 1969, 99 p.
6. Cvetkov F.F., Grigor'ev B.A. *Teplomassoobmen: Uchebnoe posobie dlja VUZov* (Heat-mass Exchange: Tutorial for Institute of Higher Education). Moscow, MJeI, 2005, 550 p.
7. *Primenenie SYSWELD dlya modelirovaniya zakalki v 2D postanovke | Delkam*. Available at: http://plmural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki/ (accessed 16 June 2013).

© Бачурин А. С., Бобин К. Н., Матвеев К. А., Курлаев Н. В., 2013

УДК 536.24:517.9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИПУСКА НА ВЕЛИЧИНУ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ*

А. С. Бачурин, К. Н. Бобин, К. А. Матвеев, Н. В. Курлаев

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20. E-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

Производилось численное моделирование закалки сечений заготовок «рамы оплета фонаря» среднемагистрального самолета. Моделирование производилось с учетом температурной зависимости характеристик материала и коэффициента конвективного теплообмена. Были получены распределения тепловых полей и напряжений в сечениях заготовок с различным припуском. Расчет производился с целью выявления предпочтительного припуска под закалку для детали перед финишной механической обработкой. Установлено влияние величины и формы припуска на остаточные напряжения. Определено, что уменьшение припуска, с целью снижения остаточных напряжений, может производиться за счет минимизации разницы температур на границе и в сердцевине детали. Снижение остаточных напряжений приведет к снижению деформаций детали после финишной механической обработки.

Ключевые слова: метод конечных элементов, закалка, механическая обработка, остаточные напряжения, остаточные деформации.

*Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта Министерства образования и науки РФ №7.822.2011.

NUMERICAL SIMULATION OF INFLUENCE OF THE STOCK ALLOWANCE ON THE RESIDUAL STRESSES IN AIRCRAFT PARTS AFTER HARDENING

A. S. Bachurin, K. N. Bobin, K. A. Matveev, N. V. Kurlaev

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marks prosp., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: bachurin.a.s@yandex.ru

The numerical simulation of hardening stock cross sections of aircraft parts was performed. The modeling was performed with the account of the temperature dependence of the material characteristics and the convective heat transfer coefficient. The authors obtained the distributions of thermal fields and stresses in the blanks with different sections allowance. The calculation was performed in order to identify the preferred allowance for hardening for a detail before the finishing milling. The influence of the value and shape of the allowance on the residual stresses was revealed. It was determined that the decrease in allowance, with the aim to reduce the residual stresses can be done by minimizing the temperature difference at the border and in the core of the part. Reduction of the residual stresses will decrease deformation of a part after finishing machining.

Keywords: *finite element analysis, hardening, milling, residual stress, residual deformation.*

При производстве деталей летательных аппаратов применяется разделенный технологический процесс механической обработки. То есть после черновых фрезерных операций применяется закалка, с целью улучшения механических характеристик материала [1]. После закалки деталь проходит чистовую механическую обработку, что связано с образованием остаточных закалочных напряжений и, как следствие, деформаций. В связи с этим встает задача выбора припуска, оставляемого после черно-

вой обработки перед закалкой для компенсации остаточных деформаций. Однако при этом остается неясным и вопрос о влиянии величины припуска на остаточные напряжения.

Для оценки влияния величины припуска на остаточные напряжения для моделирования было выбрано сечение детали «рама оплета фонаря» (рис. 1) среднемагистрального самолета, которая изготавливается с применением разделения технологического процесса механической обработки.

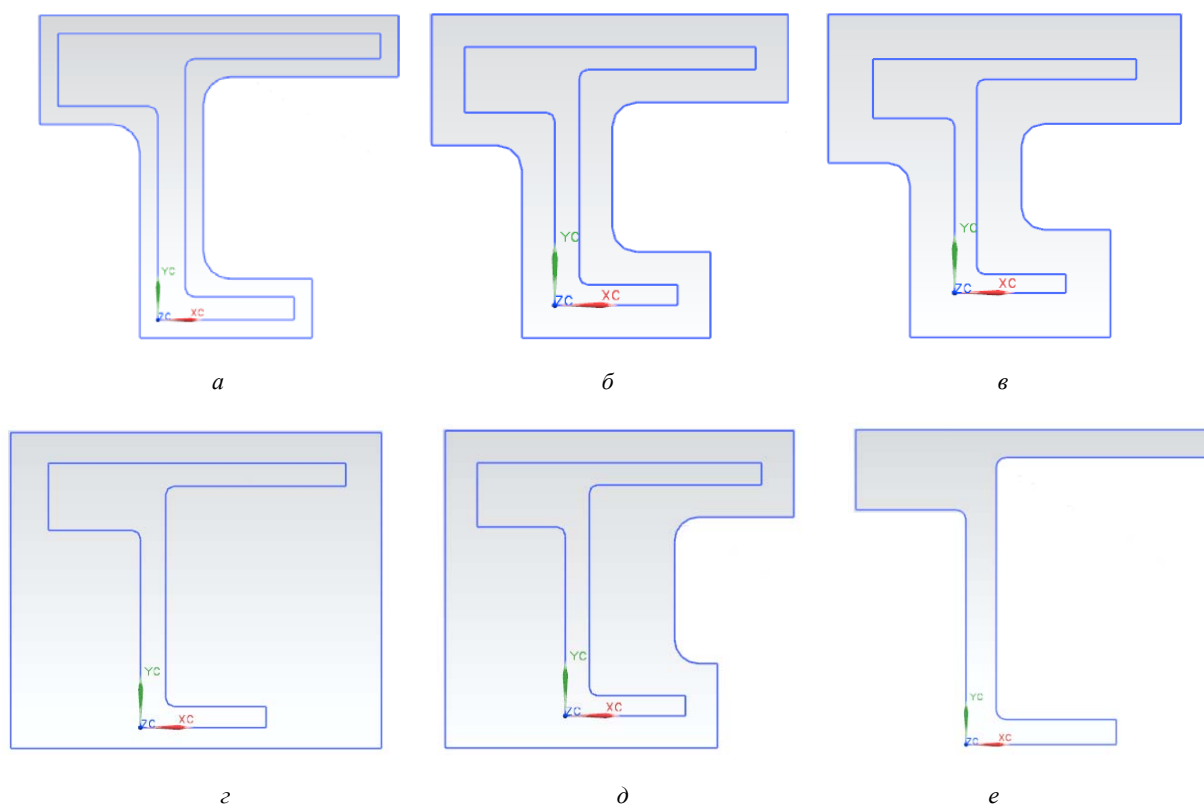


Рис. 1. Общий вид сечения детали с припуском:

a – равномерный припуск 4 мм; *б* – равномерный припуск 8 мм; *в* – равномерный припуск 12 мм;
г – не равномерный припуск от 8 мм до 18 мм; *д* – заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском;
е – сечение детали без припуска

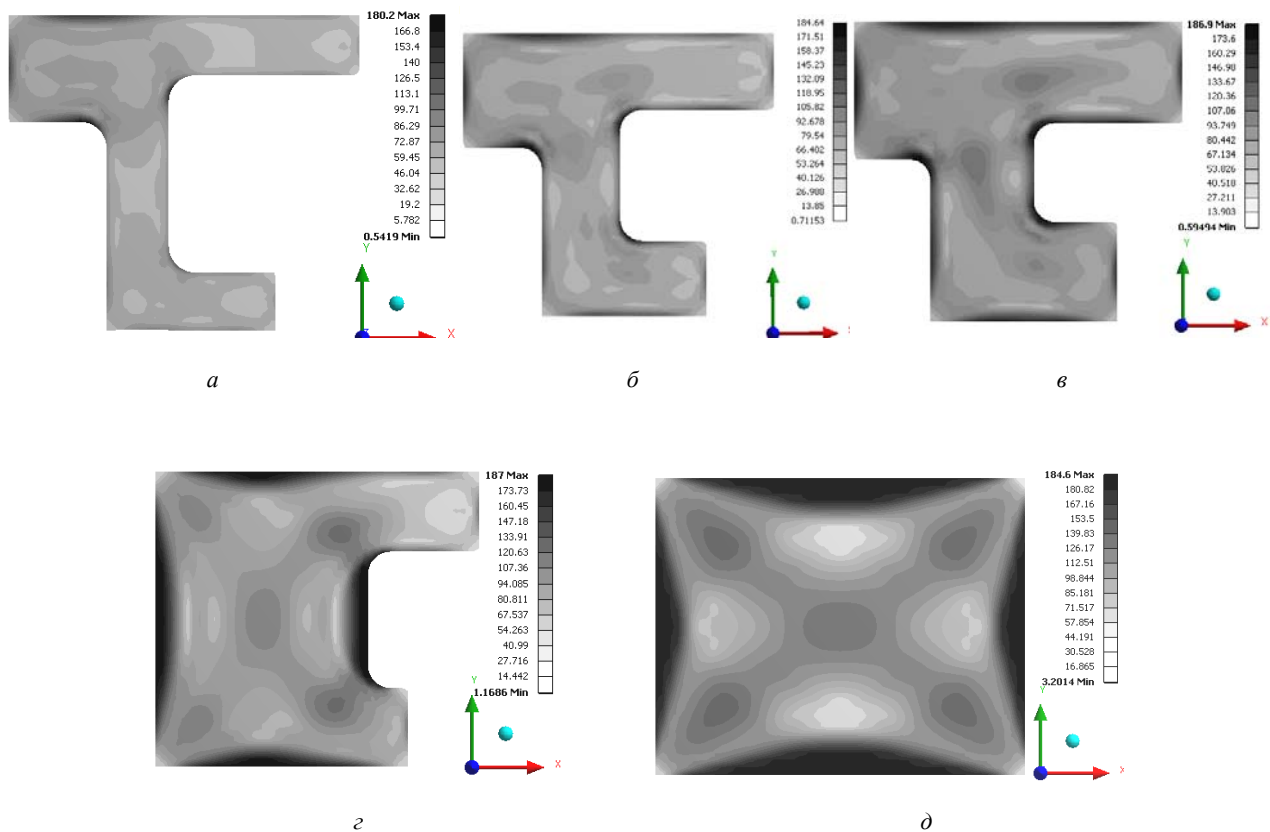


Рис. 2. Эквивалентные напряжения по Мизесу:
 а – равномерный припуск 4 мм; б – равномерный припуск 8 мм; в – равномерный припуск 12 мм;
 г – неравномерный припуск от 8 мм до 18 мм; д – заготовка прямоугольной формой
 с неравномерным припуском

В численном моделировании рассматривались 5 вариантов припуска:

- 1) равномерный припуск 4 мм (рис. 2, а);
- 2) равномерный припуск 8 мм (рис. 2, б);
- 3) равномерный припуск 12 мм (рис. 2, в);
- 4) не равномерный припуск от 8–18 мм (рис. 2, г);
- 5) заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском (рис. 2, д).

На внутренние углы всех заготовок был назначен радиус скругления 6 мм, который образуется на практике при черновой обработке за счет формы металло-режущего инструмента.

Численное решение задачи было выполнено в программном комплексе Ansys в 2D постановке. Решение проводилось в два этапа. Первый этап включал решение нестационарной тепловой задачи, а второй – решение квазистационарной структурной задачи. Для теплового анализа в качестве граничных условий задавались граничные условия 3-го рода (коэффициент конвективного теплообмена [2; 3] задавался в зависимости от температуры). Первоначальное распределение температуры принималось равномерным и равным 515 °С, температура закалочной среды – 25 °С. Характеристики материала задавались как зависящие от температуры, материал детали – алюминиевый деформируемый сплав АК6. Так как входными данными

для структурной квазистационарной задачи являются поля распределения температуры в детали с течением времени, то при решении нестационарной тепловой задачи шаг по времени был выбран равным 0,01 сек. С аналогичным шагом результаты теплового анализа передавались в структурный анализ. В тепловом анализе использовались конечные элементы Plane77 и Surf151, в структурном Plane183.

На рис. 2–3 представлены результаты расчета. На рис. 2 величина максимальных эквивалентных напряжений для каждого варианта припуска различается незначительно. Однако различие в распределении напряжений по сечениям для каждого варианта меняется в значительной степени, даже по сечениям с равномерным припуском (см. рис. 2, а–в). С ростом припуска растет площадь сечения, занятой напряжениями в диапазоне от 100 до 180 МПа (см. рис. 2, г, д). Применение умеренного значения припуска 4–8 мм (рис. 2, а, б) способствует более равномерному распределению напряжений, причем высокий уровень напряжений (более 60 МПа) наблюдается лишь в поверхностных слоях сечения, а по телу сечения преобладают напряжения менее 60 МПа. Так как после закалки последует финишная механическая обработка детали, то применение умеренного равномерного припуска предпочтительнее, потому что в этом случае

будет более низкий уровень остаточных деформаций и напряжений в готовой детали, чем при большем припуске.

Как известно [1; 5], растягивающие напряжения являются более опасными, так как могут привести к образованию трещин. Если пронаблюдать распределение нормальных напряжений σ_x на рис. 3, то можно увидеть, что растягивающие напряжения сосредоточены вблизи поверхности заготовки. Однако с увеличением припуска растет и глубина проникновения растягивающих напряжений, и для случая с прямоугольным сечением заготовки на рис. 3, д может достигать границ детали. При удалении верхних слоев материала, в которых сосредоточены остаточные растягивающие напряжения, в процессе финишной механической обработки произойдет высвобождение средних сжатых слоев материала. Вследствие перераспределения напряжений произойдет повторное образование растягивающих напряжений на поверхности уже готовой детали, а это в свою очередь, повлияет на геометрию изготовленной детали. Таким образом, назначение минимального припуска благоприятным образом сказывается на снижении остаточных деформаций и внутренних напряжений. Выше-сказанному соответствуют варианты с припуском 4–8 мм (рис. 3, а, б).

Распределение пластических деформаций представлено на рис. 4. Видно, что с увеличением припуска зоны пластических деформаций также увеличиваются. Величины пластических деформаций для всех вариантов припуска примерно одинаковы, только для варианта сечения заготовки в форме прямоугольника значительно отличается от остальных, примерно в 1,7 раза. Таким образом, минимизация припуска хоть и не способствует снижению уровня пластических деформаций, но позволяет их локализовать и свести к минимуму зоны подверженные им. Если проанализировать расположение зон пластических деформаций на рис. 4, то можно заметить закономерность в их расположении – наибольшая глубина проникновения пластических деформаций наблюдается в сторонах, сопряженных с открытыми углами, а наибольший уровень пластических деформаций наблюдается в закрытых углах.

На рис. 5 представлен график $\Delta T(t) = T(t)_{\max} - T(t)_{\min}$. Хорошо заметно, что сечение с минимальным припуском имеет минимальное значение ΔT . Это можно легко объяснить тем, что в виду меньшей толщины припуска, внутренние области охлаждаются быстрее и как следствие имеют меньшую разницу в температуре с внешними слоями. Что и приводит в конечном итоге к меньшим остаточным напряжениям.

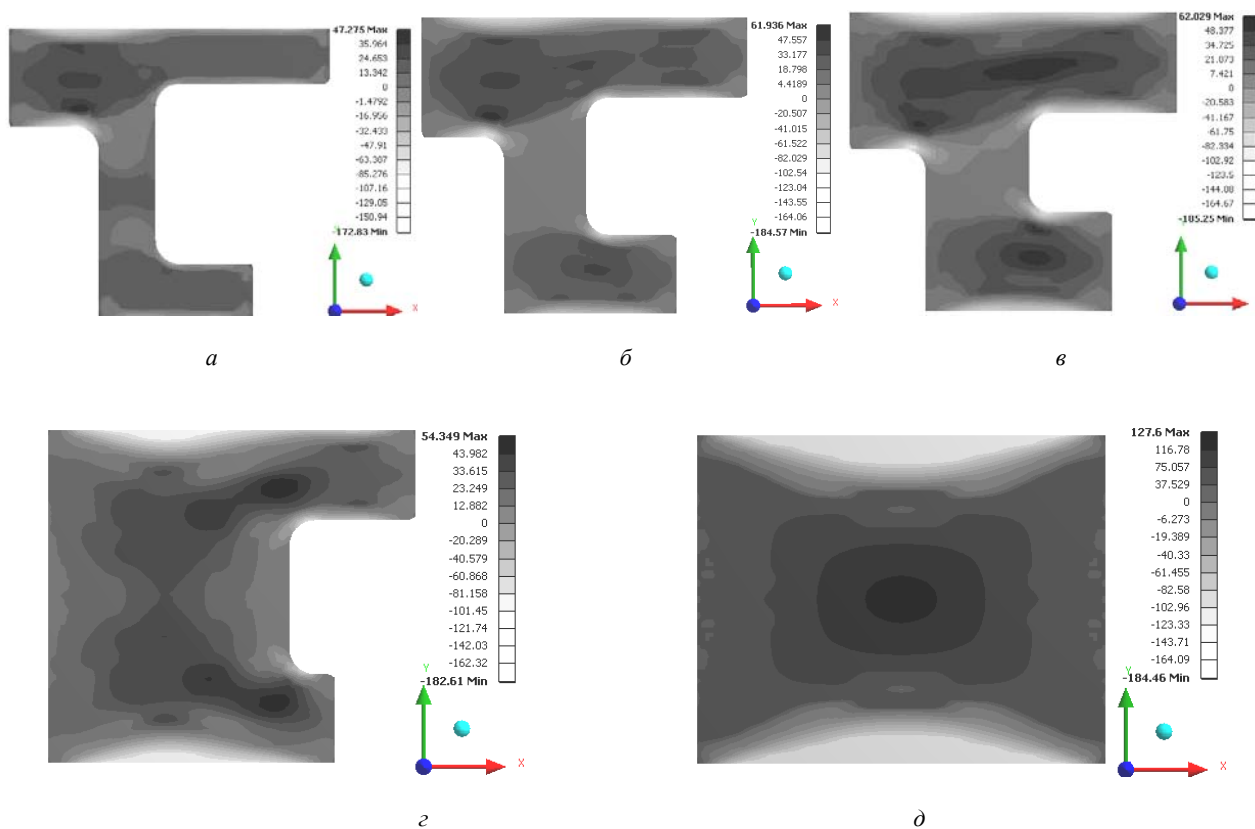


Рис. 3. Нормальные напряжения σ_x :

а – равномерный припуск 4 мм; б – равномерный припуск 8 мм; в – равномерный припуск 12 мм;
г – неравномерный припуск от 8 мм до 18 мм; д – заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском

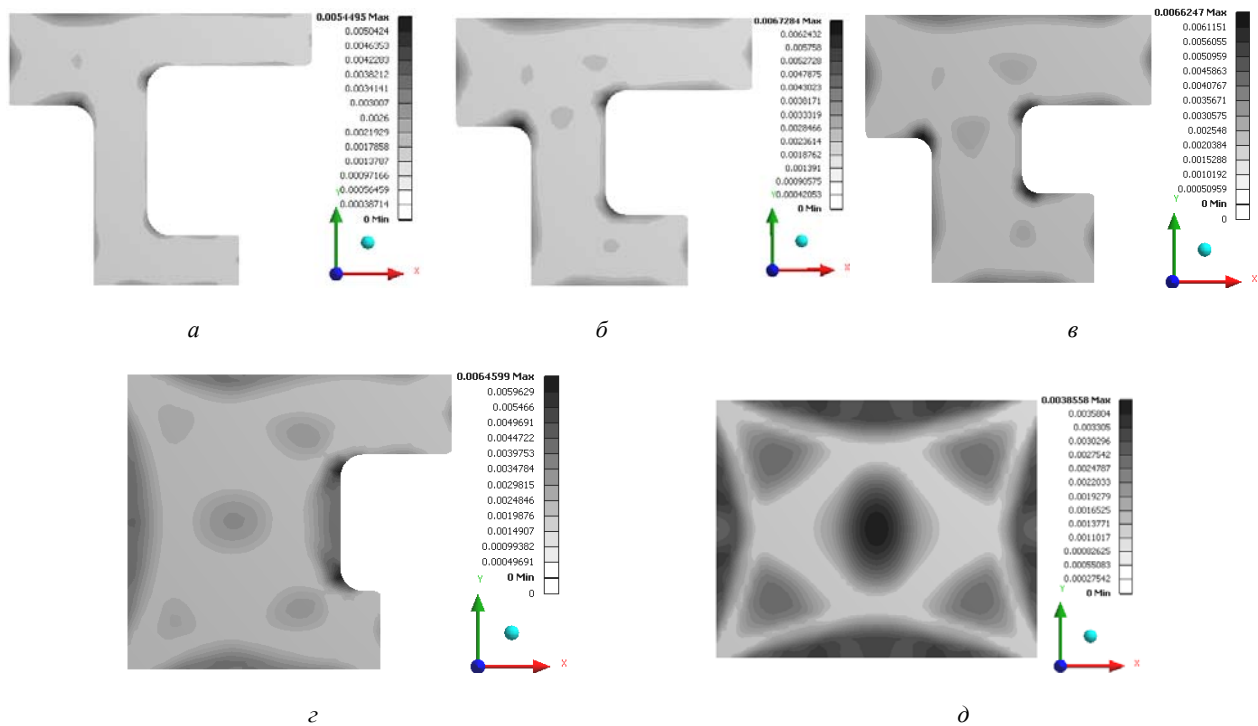


Рис. 4. Распределение пластических деформаций:
 а – равномерный припуск 4 мм; б – равномерный припуск 8 мм; в – равномерный припуск 12 мм;
 г – неравномерный припуск от 8 мм до 18 мм; д – заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском

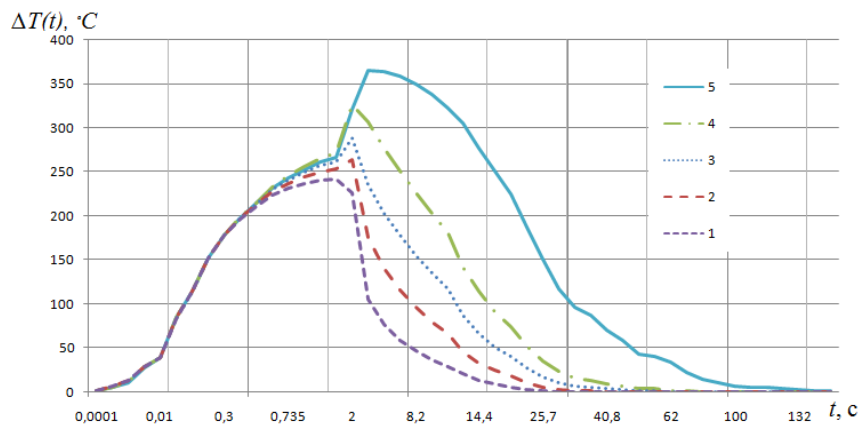


Рис. 5. Изменение $\Delta T(t)$ с течением времени в различных сечениях:
 1 – равномерный припуск 4 мм; 2 – равномерный припуск 8 мм; 3 – равномерный припуск 12 мм;
 4 – неравномерный припуск от 8 мм до 18 мм; 5 – заготовка прямоугольной формой с неравномерным припуском

Таким образом, были достигнуты следующие результаты:

1. Проведенный численный эксперимент по моделированию закалки сечения детали «рама оплета фонаря» среднемагистрального самолета показал влияние величины припуска под закалку на остаточные напряжения.

2. Установлено, что применение минимального припуска под закалку способствует уменьшению размеров областей, подверженных образованию остаточных напряжений. Зоны повышенных напряжений при

минимизации припуска сосредотачиваются вокруг открытых углов и в закрытых углах.

3. Установлено, что при закалке сечения детали «рама оплета фонаря» среднемагистрального самолета вокруг открытых углов при увеличении припуска увеличивается глубина проникновения остаточных напряжений.

4. Установлено, что минимальный припуск под закалку обеспечивает минимальное различие в температуре внешних и внутренних слоев сплава АК6 и приводит к уменьшению уровня остаточных напряжений.

Библиографические ссылки

1. Фиргер И. В. Термическая обработка сплавов. Л. : Машиностроение, 1982. 304 с.
2. Применение SYSWELD для моделирования за-
калки в 2D постановке | Делкам – Урал [Электронный
ресурс]. URL: http://plmural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki/ (дата обра-
щения 16.06.2013).
3. Исаченко В. П. Теплопередача : учебник для
вузов. М. : Энергоиздат, 1981. 416 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в тех-
нике : пер. с англ. под ред. Б.Е. Победря. М. : Мир,
1975. 438 с.
5. Арендарчук А. В., Астафьев А. А., Башнин Ю. А.
Термическая обработка в машиностроении : справоч-
ник . М. : Машиностроение, 1980. 776 с.

References

1. Firger I. V. *Termicheskaja obrabotka splavov* (Heat Treatment of Alloys). Leningrad, Mashinostroenie, 1982. 304 p.
2. *Primenenie SYSWELD dlya modelirovaniya zakalki v 2D postanovke | Delkam Available at:* http://plmural.ru/cae/tehnologicheskij_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki/ (accessed 16 June 2013).
3. Isachenko V. P. *Teploperedacha: Uchebnik dlya VUZov* (Heat Transfer: Textbook for Institute of Higher Education). Moscow, Energoizdat, 1981. 416 p.
4. Zenkevich O. *Metod konechnyh jelementov v tehnike* (Finite Element Method in Technics). Moscow, Mir, 1975. 438 p.
5. Arendarchuk A. V., Astafiev A. A., Bashnin Yu. A. *Termicheskaya obrabotka v mashinostroyenii: Spravochnik* (Heat Treatment in Machine Building: Reference Book). Moscow, Nauka, 1987. 776 p.

© Бачурин А. С., Бобин К. Н., Матвеев К. А., Курлаев Н. В., 2013

УДК 662.629.05

РАЗВИТИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ СТЕНДОВЫХ
ИСПЫТАНИЙ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Е. Н. Голубев, А. О. Николаев

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: gen@iss-reshetnev.ru

Рассматривается актуальная проблема развития и совершенствования методики стендовых испытаний бортового комплекса управления космического аппарата космических аппаратов разработки ОАО «ИСС». Авторами проведен анализ имеющихся средств стендовых испытаний БКУ, а также освещены проблемы исследования и верификации перспективных БКУ с сетевой организацией информационного обмена. Для решения рассматриваемых вопросов обосновывается необходимость разработки методики параллельного контроля процессов, а также диагностического контроля аномальных ситуаций вычислительного модуля в бортовой вычислительной сети. В работе использован объектно-ориентированный анализ, методы построения и анализа алгоритмов, методы моделирования в UML. На основе разработанных алгоритмов испытаний проведен предварительный этап отработки разветвленной сети SpaceWire. Разрабатываемые средства и методы испытаний внедряются при разработке стенда испытаний БКУ перспективных КА и могут быть использованы при отработке и верификации систем управления на основе разветвленных сетей обмена информацией. Разработанные принципы и методики являются основой для проведения наземной экспериментальной отработки БКУ нового поколения.

Ключевые слова: система управления, верификация алгоритмов управления, отработка систем управления, методики испытаний, наземные испытания.

DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF THE ON-BOARD CONTROL
SYSTEM TEST METHODS AT TEST BENCH FACILITY

E. N. Golubev, A. O. Nikolaev

JSC "Information Satellite Systems" named after academician M.F. Reshetnev
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: gen@iss-reshetnev.ru

Development and improvement of the On-Board Control System (OCS) test methods, implemented in satellites manufactured by ISS, is considered in this paper.

The authors has analyzed the available bench facilities of OCS test and indicated the problem to investigate and verify the next generation of OCS that based on network organization of data change.

In order to solve a problem mentioned above it is required to develop the methods of the processes parallel control, as well as the diagnostic control of any abnormal status which might appear in the computation unit of the On-board computation network.

Object-oriented analysis, algorithm creation and analysis methods, UML simulation methods are used during this work. Based on the created algorithms the preliminary stage of the branched Space Wire network test is fulfilled.

The developed test facility and methods are used for OCS test bench development for future satellite and may be used to check and verify Control systems based on branched networks of data change. Created conception and methods will be used as a basis to test the new generation OCS in ground conditions.

Keywords: control system, verification of control algorithms, tests of control systems, test methods, on-ground tests.

Создание системы управления современного космического аппарата требует решения большого комплекса вопросов, основным из которых является верификация и отработка системы. С этой целью одновременно с разработкой аппаратуры, алгоритмов и программного обеспечения разрабатываются средства и методики испытаний, позволяющие достаточно полно и тщательно испытать и отработать комплекс управления космических аппаратов (КА).

В космических аппаратах, создаваемых в ОАО «ИСС», основой системы управления является бортовой комплекс управления (БКУ), для отработки которого созданы стендовые средства испытаний – стенд БКУ, позволяющий обеспечить качественную отработку аппаратуры и алгоритмов функционирования БКУ.

Тенденции развития БКУ перспективных КА требуют совершенствования имеющихся средств испытаний.

Для перспективных КА разрабатывается новое поколение БКУ, имеющих ряд особенностей по сравнению с существующими в настоящее время БКУ:

- в составе БЦВМ будут использоваться процессоры нового типа PowerPC и LEON (Sparc V8) [1; 2];
- в качестве магистрали обмена используется мультиплексный канал нового типа SpaceWire, позволяющий организовывать разветвленные сети передачи данных [3];
- в архитектуре БКУ будут использоваться принципы сетевой организации;
- бортовое программное обеспечение разрабатывается с учетом необходимости поддержки новых вычислительных платформ и новой архитектуры БКУ.

Обеспечение испытаний и отработки перспективного БКУ является исключительно актуальной задачей, без решения которой невозможно создание систем управления КА с необходимыми характеристиками. В связи с этим необходимо проведение исследовательских работ по совершенствованию средств и методик испытаний БКУ перспективных КА.

БКУ современных космических аппаратов является сложной многофункциональной системой, объединяющей в себя приборы с высокой степенью интеграции. БКУ обеспечивает выполнение алгоритмов автономного управления системами КА, информационного взаимодействия с наземным комплексом управления (НКУ), выполнение программ управления и контроля. При наземной экспериментальной отработке БКУ автономно от КА и в составе КА ставятся задачи: с одной стороны, наиболее полно и глубоко исследо-

вать свойства и характеристики БКУ, подтвердить правильность заложенных алгоритмов, а с другой стороны, из-за программного выполнения функций этим комплексом, требуется проведение отладки программного обеспечения совместно с аппаратурой БКУ.

Для выполнения указанных задач требуется создание высокоинтеллектуальных средств отработки систем БКУ, включающих в себя как аппаратные средства, позволяющие имитировать среду, в которой БКУ функционирует на КА, так и программные средства, позволяющие обеспечивать интерфейс с оператором, вмешательство в выполнение бортовых программ для их тонкого исследования, а также воспроизведения информационных потоков, существующих на КА.

Для реализации задач экспериментальной отработки и испытаний БКУ в 1970-х годах в НПО ПМ был создан стенд БКУ, содержащий необходимые аппаратно-программные средства испытаний БКУ. Основные составные части БКУ показаны на рис. 1.

Как видно из показанной структурной схемы, в состав средств экспериментальной отработки и испытаний БКУ входят:

- 1) средства имитации каналов связи с наземным комплексом управления;
- 2) средства имитации взаимодействий с бортовой аппаратурой (БА);
- 3) средства отладки программ;
- 4) средства управления БКУ;
- 5) автоматизированный испытательный комплекс (АИК);
- 6) база данных испытаний;
- 7) архив программ.

Построение средств отработки и испытаний БКУ в виде указанного набора отдельных подсистем позволяет модифицировать отдельные части испытательных средств применительно к конкретному КА и развивать и совершенствовать независимо отдельные элементы средств испытаний. По мере развития и совершенствования БКУ претерпели изменения и средства его испытаний – от простейших релейных блоков и пультов индикации до сложных комплексов на базе микропроцессорных устройств и сетей ПЭВМ.

Кратко остановимся на основных составных частях испытательного комплекса стенда БКУ.

Имитатор канала связи с НКУ строится на базе контрольно-проверочной аппаратуры бортовой связной системы и обеспечивает взаимодействие БКУ с НКУ аналогично происходящему в космосе, но по низкой частоте.

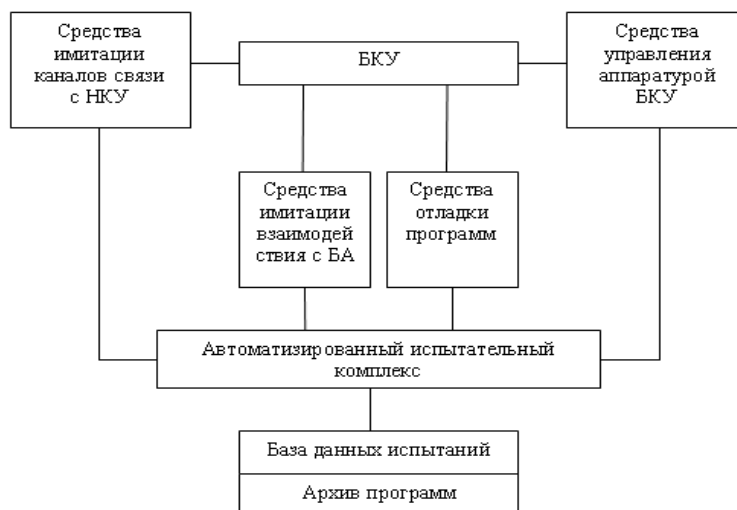


Рис. 1. Основные составные части стенда БКУ

Средства имитации взаимодействия с БА представляют из себя набор интерфейсов, аналогичных интерфейсам бортовых систем в виде релейных, аналоговых и температурных сигналов – они реализуются в виде специальных модулей различного уровня организации – от управления с панели оператором до программно управляемых устройств. В некоторых случаях для этой цели используются макеты бортовых приборов.

Средства управления БКУ представляют из себя набор устройств, обеспечивающих включение, выключение аппаратуры БКУ и задание необходимых режимов ее работы в виде специальных пультов с панелями управления оператором или с дистанционным управлением.

Средства отладки программ основываются на встроенных в процессор бортового компьютера системах отладки. Они представляют из себя, как правило, ПЭВМ с дополнительными портами и устройствами сопряжения по технологическим каналам бортового процессора.

Автоматизированный испытательный комплекс (АИК) стенда БКУ выполняет функции ввода и вывода информации по радиоканалу через имитатор канала связи с НКУ, обмен информацией между бортовой и инструментальной ЦВМ по технологическому каналу. Он также связывает между собой наземные средства испытаний БКУ и обеспечивает управление и обмен информацией с ними. В результате становится возможным организовывать процесс испытаний как по командам оператора, так и автоматически с помощью заложенных в инструментальную ЦВМ АИК программ. Для создания фрагментов испытательных программ используется разработанный в НПО ПМ язык создания циклограмм испытаний «Диполь».

База данных испытаний и архив программ служат для хранения и использования программ и результатов испытаний с соответствующими сервисными средствами и хранения отлаживаемых бортовых программ.

Описанный выше комплекс средств экспериментальной отработки БКУ для перспективных КА вы-

полнен на базе единого комплекса АПС ИК08, разрабатываемом ОАО «Информтест» (Зеленоград, Москва).

Укрупненная структурная схема стенда с использованием комплекса АПС ИК08 показана на рис. 2.

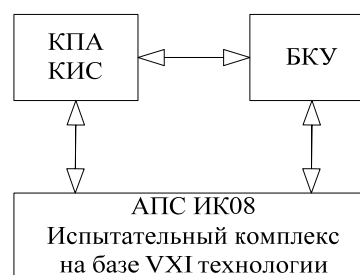


Рис. 2. Обобщенная структурная схема перспективного стенда БКУ

Комплекс АПС ИК08 строится на базе VXI технологии и реализует все вышеперечисленные функции средств испытаний БКУ, кроме функции контрольно-проверочной аппаратуры КИС (КПА КИС).

Для отработки БКУ нового поколения требуется создание новых средств испытаний, учитывающих особенности БКУ, а именно:

- для отработки процессоров нового типа PowerPC и LEON (Sparc V8) в составе БЦВМ необходимо создание новых аппаратно-программных средств, обеспечивающих исследование работы процессора и отладку программ;
- для отработки и контроля магистрали обмена на основе мультиплексного канала SpaceWire необходимо создание средств контроля магистрали SpaceWire, позволяющих также исследовать и обрабатывать разветвленные сети передачи данных [4];
- отработка сетевой организации БКУ является новой задачей, которая ранее не решалась при отработке систем управления КА и требует проведения специальных исследований и создания специализированных аппаратно-программных средств;
- отработка бортового программного обеспечения, разрабатываемого с учетом необходимости под-

держки новых вычислительных платформ и новой архитектуры БКУ, требует проведения исследования и разработки новых средств и методик.

Для обеспечения испытаний БКУ наиболее актуальным вопросом является разработка аппаратно-программных средств и методик испытаний, позволяющих обеспечить отработку и верификацию БКУ с модульно-сетевой архитектурой на базе магистралей SpaceWire.

В результате проводимых исследований выполняется разработка следующих методик и средств испытаний:

1) разработка методики параллельного контроля процессов в разветвленной сети SpaceWire с помощью предлагаемых средств стендовых испытаний;

2) разработка методики диагностического контроля аномальных ситуаций вычислительного модуля в бортовой вычислительной сети SpaceWire на унифицированном стенде БКУ;

3) разработка методики отработки реконфигурации бортовой вычислительной системы в разветвленной сети SpaceWire средствами унифицированного стенда БКУ;

4) создание аппаратно-программных средств стендовой отработки для их включения в состав средств испытаний БКУ с модульно-сетевой архитектурой.

В результате проведенной работы проводится создание унифицированных рабочих мест (стенд СБКУ-У) для отработки аппаратно-программных средств перспективных БКУ с распределенной модульно-сетевой архитектурой. Структурная схема экспериментального стенда показана на рис. 3.

В состав аппаратно-программных средств экспериментального стенда входят:

– рабочее место контроля и отработки сети SpaceWire, имеющее в составе: ПЭВМ, тестер магистралей, специализированное ПО и другое оборудование для работы в составе стенда БКУ. Рабочее место предназначено для обеспечения отработки и аттестации магистралей SpaceWire и проведение исследовательских работ БКУ с сетевой организацией. Проведен первый этап совместных исследовательских работ ОАО «ИСС» и ОАО «ИРЗ» с аппаратурой перспек-

тивного бортового вычислительного комплекса на базе процессора AT967F, позволяющий определить основные аппаратные принципы реализации и апробацию алгоритмов поддержки архитектуры сетевого канала SpaceWire;

– рабочее место лабораторного отладочного комплекса для отладки ПО БЦВМ с процессором Power PC или LEON. Указанное рабочее место обеспечивает упреждающую предварительную отработку программного обеспечения совместно с макетом реальной бортовой ЦВМ. Рабочее место строится на базе ПЭВМ, средств сопряжения с бортовой ЦВМ и специализированного ПО и позволяет проводить отладку бортового ПО, так и обеспечивать контроль и управление БЦВМ при проведении работ на стенде БКУ, загрузку программ, взаимодействие с испытательным комплексом и проведение исследовательских работ. Экспериментальные работы по исследованию архитектуры процессоров Power PC и LEON ведутся на прототипах лабораторных отладочных комплексов в рамках разработки бортовых вычислительных комплексов нового поколения;

– рабочее место для контроля и отработки распределенной сети на базе ПЭВМ и средств комплексного сопряжения с узлами сети. Рабочее место предназначено для контроля сети и проведения исследования архитектуры БКУ с сетевой организацией.

Методические принципы организации отработки приборов системы управления, соединенных в распределенную сеть, основываются на разработанной в ОАО «ИСС» системе автоматизированных испытаний на основе циклограмм испытаний, написанных на языке ДИПОЛЬ [5]. Такая система позволяет организовать автоматизированный контроль и регистрацию процессов и событий.

Для случая разветвленной сети, имеющиеся средства испытаний не могут обеспечить контроль информации одновременно в различных узлах сети. Авторами проведено исследование структуры разветвленной системы обмена данными и построена модель такой системы с использованием методов построения и анализа алгоритмов и методов моделирования в UML.

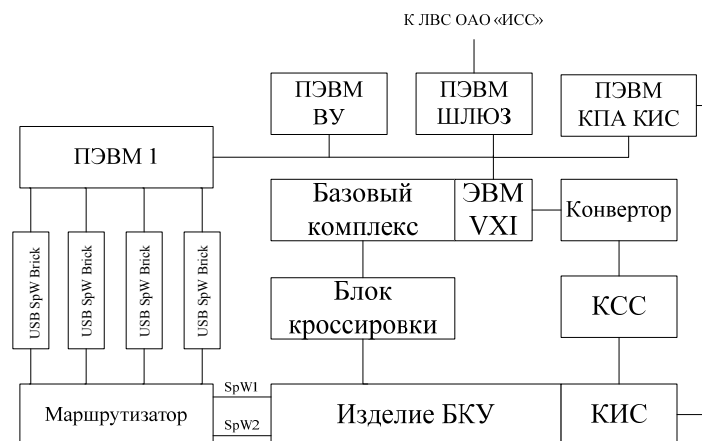


Рис. 3. Экспериментальный стенд для отработки сетевой архитектуры с каналом SpaceWire

Полученная модель позволяет описать взаимодействие приборов системы управления КА, объединенных в сеть посредством канала SpaceWire и получить алгоритм контроля процессов в системе управления, который можно реализовать в дополнительных устройствах контроля, включаемых в автоматизированный испытательный комплекс.

Такие дополнительные средства мониторинга обмена информации в информационных каналах в виде тестеров канала в ряде случаев уже используются при испытаниях КА, но не включаются в основную систему испытаний. При реализации в них вновь разработанных алгоритмов контроля сети SpaceWire такие автоматизированные средства испытаний могут сопрягаться с основным испытательным комплексом и включаться в состав автоматизированных средств отработки и испытаний БКУ. На основе разработанных алгоритмов испытаний проведен предварительный этап отработки разветвленной сети SpaceWire.

Совершенствование методики контроля и верификации вычислительной системы на базе разветвленной сети SpaceWire позволяет качественно и эффек-

тивно провести наземную экспериментальную отработку БКУ перспективных КА. Разработанные принципы и методики испытаний проходят апробацию при разработке стенда испытаний БКУ перспективных КА и могут быть использованы при отработке и верификации систем управления на основе разветвленных сетей обмена информацией.

References

1. Irom F., Farmanesh F.H. Single-Event Upset in Commercial Silicon-on-Insulator PowerPC Microprocessors (2002) *IEEE Trans. Nucl. Sci.*
2. The SPARC Architecture Manual. Version 8 (1992) *SPARC International, Inc.*
3. ECSS Standart ECSS-E-50-12C. SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks (2008) *European Cooperation for Data Standardization.*
4. Simpson M. DS-Links and C104 Routers – Networks, Routers and Transputers: Function, Performance and Applications (1993) *INMOS, IOS Press.*
5. Описание дипол 6. *Архитектурный проект. Ч. 2. Yazik DIPOL 6* // FGUP NPO PM, Zheleznogorsk, 2006.

© Голубев Е. Н., Николаев А. О., 2013

УДК 520.6

ЗВЕЗДНЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ НАНОСПУТНИКА

А. Н. Липатов¹, А. Н. Ляш¹, А. П. Экономов¹, С. А. Антоненко², Г. В. Захаркин²

¹Институт космических исследований Российской академии наук
Москва, 117997, ул. Профсоюзная, 84/32. E-mail: slip@iki.rssi.ru

²ЗАО СП «ИНТЕРАСТРО»
Москва, 117997, ул. Профсоюзная, 84/32. E-mail: eslab@mail.ru

Проведен полный цикл разработки миниатюрного звездного датчика для наноспутника от выработки концепции до разработки конструкторской документации, изготовления опытного образца и его испытаний и калибровки на специально созданном испытательном стенде. Предложены алгоритмы для снижения шумов и повышения точности. На этой базе предложена система астроориентации из нескольких согласованных миниатюрных звездных датчиков на одном наноспутнике. Такая система позволяет уменьшить требования к индивидуальному датчику, входящему в систему. В настоящее время продолжаются работы по улучшению характеристик разработанного датчика и подготовки его к использованию на наноспутниках.

Ключевые слова: звездный датчик наноспутник астроориентация.

THE STAR SENSOR FOR THE NANOSATELLITE

A. N. Lipatov¹, A. N. Lyash¹, A. P. Ekonomov¹, S. A. Antonenko², G. V. Zakharkin²

¹Space Research Institute (IKI)
84/32 Profsoyuznaya str., Moscow, 117997. E-mail: slip@iki.rssi.ru

²ZAO SP (CJSC Joint Venture) "INTERASTRO"
84/32 Profsoyuznaya str., Moscow, 117997. E-mail: eslab@mail.ru

The full cycle of development was carried out for the tiny star sensor for the nanosatellite, from the concept to the production documentation, manufacturing of a prototype and its tests and calibration at specially created optical test bench. Algorithms for decrease in noise and accuracy increase are offered. On this base the astroorientation star

tracker system of several coordinated tiny star sensors on one nanosatellite is offered. Such system allows to reduce the requirements to the individual star sensor entering the system. Works on improvement of characteristics of the developed sensor and its preparation for practical use on nanosatellites is continued now.

Keywords: star sensor, nanosatellite, astroorientation.

В настоящее время для научных задач исследования космоса и в задачах дистанционного зондирования Земли все большее значение принимает концепция использования малых спутников и аппаратов. Массогабаритные требования, предъявляемые к служебным системам, в том числе приборам астронавигации, становятся ключевыми при разработке таких устройств. Особенно это характерно для аппаратуры наноспутников, малых аппаратов с собственной массой порядка десятков килограммов. Применение в таких спутниках традиционных высокоточных систем ориентации массой в килограмм и более становится проблематичным. Значительное (в несколько раз), уменьшение энергопотребления и массогабаритных параметров отдельного датчика ориентации позволяет объединить такие датчики в систему, что дает возможность по-иному взглянуть на систему ориентации космического аппарата (КА). Установка нескольких малогабаритных датчиков на космический аппарат снимает много проблем с режимом управления и увеличивает надежность всего космического аппарата. Миниатюризация приборов астроориентации обеспечивается, прежде всего, современными технологиями и некоторым снижением требований к точности и чувствительности отдельного датчика.

Далее представлены обоснования и результаты разработки и создания макета миниатюрного звездного датчика. Приводятся его основные характеристики и результаты наземных испытаний на штатных объектах.

Обоснование выбора угла зрения приемного объектива. Выбор угла зрения прибора был сделан на основе программного моделирования звездного неба. Разработанная для этого программа Star Scanner позволяла оптимально выбрать угол зрения прибора. Вычислялось среднее, максимальное и минимальное количество звезд, попадающих в поле зрения звездного датчика при работе во всех точках звездного неба. В виде базы данных в программе использовался стандартный звездный каталог Bright Star Catalogue (BSC) для звезд со звездными величинами до 6,5, содержащий до 9000 звездных объектов [1]. В программе изначально задавались звездная величина и угол зрения прибора, в пределах которого осуществляется подсчет числа звезд со звездными величинами, большей или равной заданной. Подсчитывались звезды, попавшие в поле зрения прибора для каждой точки звездного неба при сканировании по долготе и широте.

Для работы алгоритма распознавания рассматриваемого датчика звездных координат требуется, чтобы в поле зрения прибора всегда попадало минимум три звезды, различаемые датчиком. В результате программного моделирования для доступных объективов и матриц, оптимальным углом зрения был выбран

полный угол зрения прибора в 41° . Подтверждением правильности этого выбора являются расчетные данные программного моделирования по количеству видимых звезд в поле зрения прибора, которые приведены на рис. 1: из графика видно, что в поле зрения прибора с углом зрения $41 \pm 1^\circ$ всегда попадают минимум три звезды с яркостью, большей или равной четвертой звездной величине.

Произведен расчет для датчика с эффективным полем зрения, численно равным сумме полей зрения двух таких приборов. Результат расчета показал, что регистрация минимального числа звезд, равного пяти, осуществляется для объектов с яркостью до 3,6 звездных величин. Это означает, что в поле зрения одного из совместно работающих датчиков всегда будут обнаруживаться три звезды со звездной величиной не менее 3,6. Эффективное увеличение поля зрения при совместном использовании трех датчиков приводит к дальнейшему понижению порога обнаружения звезд по яркости в отдельном датчике. Более того, при совместном использовании трех и более датчиков можно определить некоторый оптимальный угол взаимной ориентации осей датчиков, позволяющий еще более снизить требования к чувствительности звездного датчика. Так, например, для трех датчиков, расположенных по сторонам куба, каждому из датчиков достаточно обнаруживать объекты третьей звездной величины. Уменьшение требования к обнаружительной способности датчиков позволяет уменьшить число звезд, записанных в инструментальный каталог прибора, и тем самым повысить надежность реализуемых в приборе алгоритмов распознавания.

Одновременное измерение координат несколькими звездными датчиками позволяет уточнить величину угловых измерений или повысить частоту передачи измерений. Наличие нескольких датчиков решает также проблему «ослепления» датчика засветкой от ярких объектов. Однако выбор количества датчиков, их взаимной ориентации и алгоритмов совместной работы не может быть универсальным и должен обуславливаться требованиями, предъявляемыми к КА в целом.

Обоснование выбора светочувствительной матрицы датчика. В разработанном звездном датчике используется активный пиксельный CMOS APS датчик (CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor, APS – Active Pixel Sensor). У этого КМОП-сенсора существует возможность произвольного доступа к каждому пикселу, что позволяет считывать не матрицу целиком, а лишь ее некоторые области. Устройства, основанные на технологии КМОП, отличаются повышенной надежностью, меньшим потреблением мощности и, соответственно, меньшим тепловыделением при более компактном исполнении.

Для работы в составе звездного датчика выбрана матрица Star1000 производства бельгийской фирмы FillFactory [2]. Матрицы, разработанные данной фирмой, обладают лучшим коэффициентом чувствительности при минимальном уровне собственного темнового шума среди КМОП-матриц, известных авторам. Матрицы Star1000 разрабатывались по заказу Европейского космического агентства для космического применения. Фирмой предполагается выпуск новых модификаций с повышенной в два раза чувствительностью и пониженными шумами (НАС-матрица), также анонсирована разработка матрицы с интегрированной программируемой логикой (LCMS-матрицы).

Матрицы и заготовки для матриц этого типа проходят испытания по стандартам MIL-STD-883. Все матрицы Star1000, вне зависимости от типа исполнения, стойки к воздействию радиации. Фирма заявляет величину дозы порядка 200 крад, имеются данные экспериментальных исследований [3] по радиационной стойкости. Следует отметить, что исследования проводились при облучении матриц протонами с энергиями до 60 МэВ. Однако в работе [4] отмечается тот факт, что в суммарной дозе облучения, связанной с солнечными вспышками, часть дозы приходится на протоны с энергиями в районе 100 МэВ. Данные в литературе на предельные дозы облучения матриц высокоэнергетическими частицами отсутствуют. До получения данных по этому вопросу следует проявлять определенную осторожность в применении этих матриц, т. е. их можно применять в приборах для короткоживущих (до 3–5 лет) КА или работающих на радиационно-безопасных орбитах.

Оценка величины порогового сигнала. Наличие большого количества собственных шумов в активно-пиксельных датчиках является главным недостатком по сравнению с ПЗС-матрицами. Поэтому требуются дополнительные усилия по компенсации шума.

Примем, согласно [5], следующую математическую модель распределения сигнала по ячейкам матрицы:

$$D(x, y) = (K(x, y)I(x, y) + N_{dc}(x, y) + N_s(x, y) + N_r(x, y))A + N_q(x, y),$$

где $D(x, y)$ – число фотоэлектронов, измеренное в пикселе с координатами (x, y) ; A – коэффициент усиления; $I(x, y)$ – число фотоэлектронов, образовавшихся в пикселе под действием падающего светового излучения; $K(x, y)$ – чувствительность пиксела, безразмерная величина, имеющая нормальное распределение со средним значением, равным единице, и дисперсией σ_K^2 .

Можно выделить следующие типы шумов, характерных для КМОП и ПЗС-матриц:

1) N_s – дробовой шум. Является следствием дискретной природы света и имеет пуассоновское распределение с дисперсией

$$\sigma_{N_s}^2 = (A \cdot I + N_{dc} \cdot A);$$

2) N_{dc} – шум темнового сигнала. Имеет вид нормального распределения со средним значением N_{dc} и дисперсией $\sigma_{N_{dc}}^2$;

3) N_r – шум считывания (FPN). Это базовый уровень шума, присутствующий в изображении с нулевым уровнем экспозиции, когда шум темнового сигнала равен нулю. Имеет вид нормального распределения с нулевым средним и дисперсией $\sigma_{N_s}^2$. Такой тип шума зависит только от положения пиксела и не зависит от времени;

4) N_q – шум квантования, связанный с разрядностью АЦП; данная величина равномерно распределена на интервале $\pm 0,5 \cdot q$, $q = (1,1/A)/(2^{10} - 1)$ для матрицы, имеющей встроенный десятиразрядный АЦП и дисперсию $\sigma_{N_q}^2 = q^2/12$.

Введем величину F – пороговую чувствительность датчика, которая определяет количество фотоэлектронов, численно равное ошибке измерений:

$$F(T, t) = (N_{dc}(T)t + \sigma_{N_s}^2(T, t) + \sigma_{N_t}^2)^{0,5},$$

где T – температура датчика; t – время интегрирования;

$$\sigma_{N_s}^2(T, t) = \sigma_{N_r}^2(T) + \sigma_{N_{dc}}^2(T, t)$$

здесь $\sigma_{N_s}^2$ – шум, измеренный при калибровке темнового тока при различных температурах и временах интегрирования;

$$\sigma_{N_t}^2 = \sigma_{kTC}^2 + \sigma_s^2 + \sigma_{N_q}^2$$

где $\sigma_{N_t}^2$ – временной шум в единичном пикселе; σ_s^2 – шум считывания единичного пиксела, измеряемый в различные промежутки времени.

Результаты оценок порога регистрации для различных режимов обработки сигнала приведены в таблице.

Следует отметить, что при расчетах использовались наихудшие значения параметров матрицы, приводимые производителем. Для матриц, предназначенных для работы в космических приборах, производится отбор по шумовым характеристикам и шумам считывания, для таких матриц значения собственных шумов и их неоднородность уменьшаются в 1,5–2 раза.

Таблица 1

Процедуры исправления шумовых ошибок

Метод обработки	Число фотоэлектронов F			
	$T = 22^\circ \text{C}$		$T = 0^\circ \text{C}$	
	$t = 0,1\text{c}$	$t = 0,5\text{c}$	$t = 0,1\text{c}$	$t = 0,5\text{c}$
Вычитание среднего значения шума, определенного по всей матрице	767	970	543	562
Вычитание среднего значения шума, определяемого по окнам 20×20 пикселей	426	622	355	375
Вычитание калибровочного среднего по колонкам	604	838	365	393
Вычитание калибровочного темнового кадра	88	106	81	84

При оценках использованы следующие процедуры исправления шумовых ошибок:

1. Вычитание среднего значения шума, определенного по всей матрице. При вычислении среднего значения используется предыдущий кадр. Такая обработка текущего кадра не требует дополнительной памяти и производится во время считывания сигнала с матрицы.

2. Вычитание среднего значения шума, определяемого по окнам. Возможна реализация плавающего окна. Такая процедура требует небольшого объема встроенной памяти.

3. Вычитание калибровочного среднего по колонкам. Такая процедура предполагает вычитание шума считывания для каждой колонки. Имеет смысл применять только при понижении температуры, при минимальных шумах темнового тока.

4. Вычитание калибровочного темнового кадра. Процедура вычитания калибровочного кадра требует наличия памяти с объемом, равным объему кадра. Также увеличивается время обработки текущего кадра. Однако, поскольку КМОП-матрица позволяет осуществлять доступ к отдельным фрагментам изображения, содержащим пиксели с идентифицированными объектами, можно существенно ускорить обработку изображения.

По приведенным оценкам можно заключить:

– что доминирующим шумом при больших экспозициях является темновой шум и его неравномерность распределения по матрице;

– понижение температуры до 0 °С значительно уменьшает темновой шум и доминирующим становится шум считывания;

– наилучшие результаты по компенсации шума достигаются при реализации методов обработки изображения, связанных с покадровым вычитанием шума; однако использование таких методов требует повышенной производительности процессора и наличия больших объемов внешней памяти; как видно из результатов оценок, понижение температуры при реализации такого метода не актуально, достаточно осуществить только термостабилизацию сенсора.

В разработанном датчике, на различных этапах работы, реализуются комбинации этих методов.

Обоснование выбора объектива. Для обеспечения угла зрения прибора $2\omega = 41 \pm 1^\circ$ при размере матрицы $15,36 \times 15,36$ мм, необходим объектив с фокусным расстоянием $f = 20$ мм. Объектив должен быть светосильным для обеспечения необходимого потока излучения на светочувствительный элемент. В объективах звездных приборов должны быть минимизированы геометрические искажения в фокальной плоскости, прежде всего дисторсия и аберрации в широком спектральном диапазоне. Объектив должен быть максимально легким, простым и надежным. Выбор конструкции объектива представляет компромисс между этими противоречивыми требованиями.

В звездном датчике использован объектив «Руссар-Арго-3». Этот миниатюрный высокоточный объектив, предназначенный для работы в режиме с постоянным фокусом, построен по схеме высокоточных

аэросъемочных объективов типа «Руссар» (конструкции М. М. Русинова), с улучшенным светораспределением по функции $\cos^3\omega$. В объективе минимизированы геометрические искажения: сферические аберрации, астигматизм и дисторсия изображения. Абсолютная дисторсия объектива не превышает 5 мкм. Объектив специально разработан для космических экспериментов, рассчитан на применение в вакууме и в температурном диапазоне от -55 до $+85$ °С. Оптические элементы изготовлены из радиационностойких стекол, металлические элементы конструкции – из титанового сплава. Объектив проходил испытания на механические и климатические воздействия в составе приборов космического исполнения.

Таблица 2

Оптические характеристики объектива

Фокусное расстояние	$f = 19,27$ мм
Относительное отверстие	$D:f = 1:3$
Угловое поле	$2\omega = 41^\circ$
Объектив исправлен для длины волны	0,63 мм
Диаметр кружка рассеяния	30 мкм
Диаметр входного зрачка	6,44 мм
Масса объектива без бленды	0,05 кг

Энергетический расчет звездного датчика и экспериментальные результаты. Для обеспечения надежной работы системы ориентации необходимо обеспечить некоторое соотношение между полезным сигналом и шумом. Выбор величины этого соотношения зависит от вида обработки, применяемой в данном приборе. В датчике применяются различные алгоритмы обработки на различных этапах работы прибора. Условно можно выделить три основных режима работы: обнаружение звезд над уровнем шума, распознавание звезд и режим слежения.

Результаты энергетических расчетов датчика приведены на рис. 2. Расчеты проводились на основе методик, приведенных в литературе [6; 7], с учетом характеристик матрицы и объектива. Дополнительно введены поправочные коэффициенты:

коэффициент $k1 = 0,56$, учитывающий увеличение площади изображения из-за размазывания изображения за время экспозиции;

коэффициент $k2 = 0,5$, включающий коэффициент заполнения пиксела светом при случайном положении центра пятна рассеяния и коэффициент запаса.

Проведенные экспериментальные измерения подтвердили полученные расчеты. Измерения проводились как на фотометрическом стенде, так и при работе по реальному звездному небу. Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы:

с помощью прибора можно обнаруживать и выделять звезды со звездной величиной, равной 3,2, при экспозиции 0,5 с и при использовании упрощенного алгоритма обработки;

прибор позволяет обнаруживать и выделять звезды со звездной величиной до 4,2, при экспозиции 0,5 с и реализации время затратного алгоритма обработки с использованием калибровочного кадра.

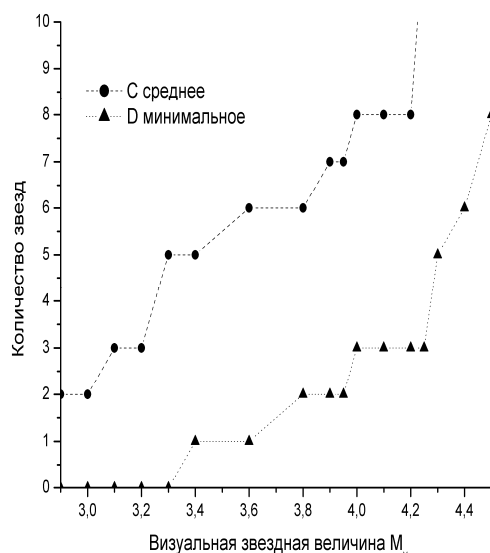


Рис. 1. Зависимость количества звезд, попадающих в поле зрения прибора от звездной величины

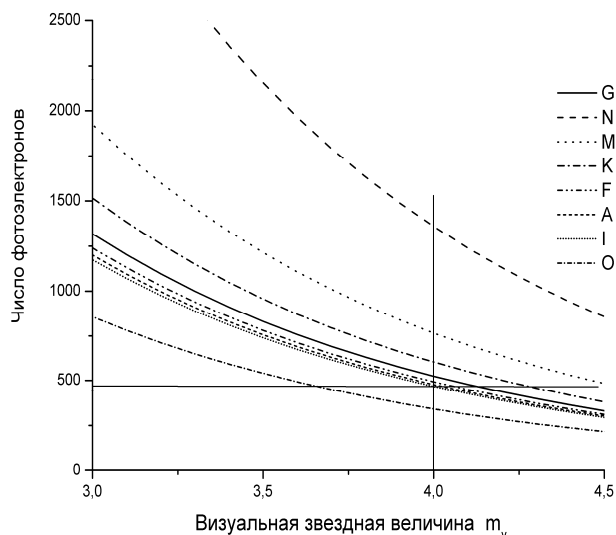


Рис. 2. Зависимость числа фотоэлектронов от звездной величины для звезд различного спектрального класса при экспозиции 0,5 с

Различие в сигналах от звезд различного спектрального класса потребовало создания собственного инструментального каталога, с учетом спектральной чувствительности прибора, с целью ограничения количества звезд с инструментальной видимостью до 4,5.

В ИКИ РАН разработан макет миниатюрного звездного датчика, предназначенного для работы в составе систем ориентации малых спутников.

Таблица 3

Основные технические характеристики датчика

Масса	250 г
Габаритные размеры	67,5×56×91 мм
Напряжение питания	27 В
Потребляемая мощность	3 Вт
Частота выдачи информации	≥2 Гц
Погрешность определения ориентации: в грубом режиме (угловая скорость вращений до 0,15 град/с)	≤3 угл. мин
в точном режиме (угловая скорость вращений до 0,05 град/с)	≤30 угл. с

Внешний вид датчика представлен на рис. 3.

В настоящее время продолжают работы по улучшению характеристик разработанного датчика. Работы ведутся в направлении как улучшения и оптимизации алгоритмов работы, так и миниатюризации датчика. Исследуется возможность применения новых перспективных светочувствительных матриц.

Выводы: разработан, изготовлен в виде опытного образца и испытан миниатюрный звездный датчик для системы ориентации наноспутников.

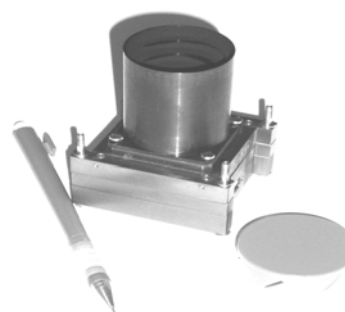


Рис. 3. Внешний вид миниатюрного звездного датчика

Библиографические ссылки

1. Bright Star catalogue. /5th Revised Ed. Hoffleit E.D., Warren Jr.W.H.
2. Star 1000 datasheet. URL: <http://www.cypress.com/products/?rpn=STAR-1000>.
3. Bogaerts J, Dierickx B., Meynants G., Uwaerts D. Total Dose and Displacement Damage Effects in a Radiation-Hardened CMOS APS // IEEE transaction on electron devices. January 2003. Vol. 50. № 1. P. 84–90.
4. Аванесов Г. А., Акимов В. В., Воронков С. В. Исследование влияния космической радиации на электрорадиоизделия и оптоэлектронные приборы // Космическое приборостроение. Координатно-временные системы с использованием космических технологий. Приборы для космических исследований планет и Земли : сб. тр. по результатам выездного семинара ИКИ РАН под ред. Р. Р. Назирова. Таруса, 2006. М. : ИКИ РАН, 2007. С. 55–70.
5. Healey G. E., Kondepudy R. Radiometric CCD camera Calibration and Noise estimation // IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence. March 1994. Vol. 16, № 3. P. 267–276.

6. Малинин В. В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами. Новосибирск : Наука, 2005.

7. Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Карелов А. И. Интеграция командных приборов как путь оптимизации системы управления космического аппарата // Космическое приборостроение. Координатно-временные системы с использованием космических технологий. Приборы для космических исследований планет и Земли : сб. тр. по результатам выездного семинара ИКИ РАН под ред. Р. Р. Назирова, Таруса, 2006. М. : ИКИ РАН, 2007. С. 43–54.

References

1. Bright Star catalog. 5th Revised Ed. Hoffleit E. D., Warren Jr. W. H.

2. Star 1000 datasheet <http://www.cypress.com/products/?rpn=STAR-1000>.

3. Bogaerts J., Dierickx B., Meynants G., Uwaerts D. Total Dose and Displacement Damage Effects in a Radiation-Hardened CMOS APS. *IEEE transaction on electron devices*. January 2003. Vol. 50, № 1, p. 84–90.

4. Avanesov G. A., Akimov V. V., Voronkov S. V. *Kosmicheskoye priborostroyeniye. Koordinatno-vremennyye sistemy s ispol'zovaniyem kosmicheskikh tekhnologiy. Pribory dlya kosmicheskikh issledovaniy planet i Zemli : sb. tr. po rezul'tatam vyyezdnogo*

seminara IKI RAN pod red. R. R. Nazirova (Space instrumentation. Coordinate-time systems with use of space technologies. Devices for space researches of planets and Earth: Proceedings of an seminar ИКИ RAS under the editorship of R.R.Nazirov). Tarusa, 2006. Moscow, ИКИ RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, 2007, p. 55–70.

5. Healey G. E., Kondepudy R. Radiometric CCD camera Calibration and Noise estimation // *IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence*. March 1994. Vol. 16, No. 3. P. 267–276.

6. Malinin V. V. *Modelirovaniye i optimizatsiya optiko-elektronnykh priborov s fotopriyemnymi matritsami* (Modeling and optimization of optiko-electronic devices with photosensitive array sensors). Novosibirsk : Nayka, 2005.

7. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Karelov A. I. *Kosmicheskoye priborostroyeniye. Koordinatno-vremennyye sistemy s ispol'zovaniyem kosmicheskikh tekhnologiy. Pribory dlya kosmicheskikh issledovaniy planet i Zemli : sb. tr. po rezul'tatam vyyezdnogo seminary IKI RAN pod red. R. R. Nazirova* (Space instrumentation. Coordinate-time systems with use of space technologies. Devices for space researches of planets and Earth. Proceedings of an seminar ИКИ RAS under the editorship of R. R. Nazirov). Tarusa, 2006. Moscow, ИКИ RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, 2007, p. 43–54.

© Липатов А. Н., Ляш А. Н., Экономов А. П., Антоненко С. А., Захаркин Г. В., 2013

УДК 681.323

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ АВТОМАТИКОЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ*

О. В. Непомнящий¹, К. Г. Охоткин², В. А. Хабаров¹

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: 2955005@gmail.com

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: okg2000@mail.ru

Изложены результаты анализа основных проблемных направлений, возникающих при проектировании электронных систем управления исполнительной автоматикой перспективных космических аппаратов. Рассмотрены методы и решения известных проблем технологического и алгоритмического планов, а так же системной организации проектируемых комплексов управления. Предложен интегрированный подход к системной организации бортовых устройств управления, базирующийся на применении в качестве центральных управляющих систем однокристальных, микропроцессорных вычислительных комплексов высокой надежности с динамически реконфигурируемой архитектурой в цифровой части. Рассмотрен пример организации и реализации модуля управления шаговым двигателем для системы раскрытия антенны в рабочее положение, выделены основные достоинства предлагаемого подхода на примере конкретной реализации.

Ключевые слова: Исполнительная автоматика, космический аппарат, микропроцессор, дестабилизирующие факторы, контроллер, шаговый двигатель

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы», государственный контракт 14.513.11.0117.

MICROELECTRONIC SYSTEMS FOR AUTOMATION OF PERSPECTIVE SPACE VEHICLES

O. V. Nepomnuashy¹, K. G. Ohotkin², V. A. Habarov¹

¹Siberian Federal University

79 Svobodny prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: 2955005@gmail.com

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: okg2000@mail.ru

The article considers the major problems of the control unit organization for spacecraft automation equipment. The advantages of transition to the program of microprocessor control by automation for perspective space vehicles are stated. The methods and solutions of the known problems and algorithmic technology plans, as well as the systemic organization of the designed control systems are discussed. The authors propose an integrated approach to the system organization of the on-board control devices based on the application of single-chip microprocessor-based computer systems of high reliability with a dynamically reconfigurable architecture in the digital part, as the central control systems. An example of organization and implementation of a module for stepper motor control system for disclosure of the antenna to operating position is considered, along with the main advantages of the proposed approach on the example of its implementation.

Keywords: automation, spacecraft, microprocessor, destabilizing factors, controller, stepper motor.

В условиях космической среды функционирование электронных систем подвержено значительным нагрузкам: излучение тяжелых ионов, значительные перепады температур, вибрационные нагрузки при старте и торможении и др. Сегодня, к электронным системам управления (ЭСУ) исполнительных автоматикой космических аппаратов (КА) предъявляются крайне жесткие требования.

Высокая надежность существенна для всех видов исполнительных автоматик (ИА) и систем управления КА. Она обеспечивается комплексом мероприятий на всех этапах создания и подготовки, включая повышение надежности его элементов, аппаратуры и оборудования, строгим технологическим контролем на всех стадиях изготовления, тщательной отработкой систем и агрегатов с имитацией условий космического полета, проведением комплексных предполетных испытаний и др.

Основной проблемой обеспечения надежности функционирования электронной аппаратуры КА является обеспечение защиты от проникающей радиации. С целью повышения надежности ЭСУ в КА используется массивное и дорогостоящее экранирование для защиты важных электронных цепей и элементов от космического излучения. Кроме того применяют дублирование, триплирование, резервирование отдельных узлов, а также автоматические схемы распознавания отказов в функционировании электронных систем и их замены и др.

Однако, при реализации ЭСУ на основе аналоговой или цифровой элементной базы малой степени интеграции, такие меры приводят к увеличению веса, габаритов и энергопотребления оборудования.

Тем не менее, при проектировании ЭСУ в виде однокристалльных микросистем такой подход является на сегодняшний день единственно приемлемым.

Например, в ПЛИС RTAX-S/SL от компании Actel архитектура микросхем оптимизирована для работы в

условиях космического облучения, все регистры выполнены с тройным резервированием, а сигнал на выходе регистров определяется мажоритарной схемой.

Среди наиболее перспективных технологий создания радиационно стойких микросхем следует отметить структуры на основе кремния на сапфире [1], применение соединения кремния с германием (SiGe) для разработки гибридных систем [2] и др.

С точки зрения системной организации одной из основных тенденций в области достижения высоких технологических показателей аэрокосмической техники является унификация и стандартизация оборудования и интерфейсов комплексов бортового оборудования (КБО). Одним из основных направлений развития ЭСУ является создание высоконадежных бортовых управляющих комплексов, базирующихся на специализированных процессорах, предназначенных для обработки цифровых и аналоговых сигналов [3].

Тем не менее, следует учитывать, что конечные электронные и электромеханические системы управления для исполнительных автоматик КА, как правило, используют несложные алгоритмы формирования управляющих воздействий, следовательно, центральные вычислители таких систем не требуют высокопроизводительных процессорных ядер.

Здесь на первый план помимо надежности проектируемой системы выходит унификация и универсальность ЭСУ. Система управления отдельным электромеханическим или электронным узлом ИА должна иметь в первую очередь высокую защищенность, надежность и обеспечивать максимальную универсальность для использования в составе ЭСУ различных узлов ИА.

Решение означенных проблем должно базироваться на комплексном, системном подходе, охватывающем все стороны проектирования, испытаний и эксплуатации ЭСУ. Реализация конечной ЭСУ должна основываться на единой, унифицированной аппаратно-программной платформе, объединяющей все основные управляющие системы КА.

Разработка ЭСУ должна основываться на принципах высокоуровневого сквозного проектирования, с реализацией основного вычислителя в виде однокристалльного, специализированного процессора на реконфигурируемом кристалле, организованного на основе послонного триплирования основных модулей с мажоритированием и дублированием основных вычислительных узлов.

Межблочный обмен такого процессора может быть реализован на основе одного из популярных внутрикристалльных шинных протоколов, например AMBA, а дополнительную защиту от проникающих воздействий обеспечит реализация процессора на (SiGe) пластинах с уровнем проектных (топологических) норм элементов порядка (0,25–0,07 мкм и далее).

Учитывая тот факт, что в большинстве ЭСУ ИА действующие процессы попадают под определения «медленно протекающих» имеется возможность осуществлять динамическое реконфигурирование кристалла под текущую задачу в режиме реального времени. Например, осуществлять параллельное управление различными электромеханическими системами ИА [4]. Динамическая реконфигурация позволит значительно сократить занимаемую на кристалле площадь и как следствие уменьшить энергопотребление и повысить надежность системы за счет интеграции ЭСУ непосредственно в модуль ИА.

Практическое применение означенных принципов отражено в реализуемой авторами системе управления синхронным двигателем с электромагнитной редукцией (СДЭР), входящим в состав модуля управления раскрытием антенны спутника связи в рабочее положение.

Основной задачей проекта является обеспечение требуемой точности частоты встроенного генератора импульсов СДЭР от 0 Гц до 100 Гц с шагом 0,006103888 Гц (допускается погрешность 0,1 %), а так же параметров разгона СДЭР с частоты 10 Гц до требуемой со скоростью 5-10 Гц/с и обеспечение формирования двуполярных, ступенчатых сигналов управления двигателем.

Для решения этих задач разрабатываемая микроэлектронная система управления ШД включает в себя регулятор тока, блок коммутации фаз двигателя и регулятор скорости вращения. В качестве управляющего устройства используется СБИС центрального вычислителя функционирующего по оригинальным алгоритмам [3] и выполняющего функцию регулятора скорости вращения.

Вычислитель разработанного контроллера функционирует в режиме программного обмена с бортовым комплексом управления (БКУ), управляет регулятором тока (РТ), блоком коммутации фаз двигателя и блоком сопряжения с БКУ. В свою очередь, блок коммутации фаз двигателя (БКФ) обеспечивает требуемые электротехнические параметры коммутируемого сигнала и порядок коммутации фаз. В состав РТ входят компараторы, цифроаналоговые преобразователи и блок преобразования напряжения в ток.

Для поддержания требуемых параметров тока в соответствующих фазах двигателя, вычислитель управляет РТ, формируя на выходе последнего ток требуемой величины. Такой подход реализуется на программном уровне с помощью цифро-аналогового преобразователя, который устанавливает границы для компараторов. Встроенные на кристалл компараторы настроены на «оконный» режим работы и при выходе тока за установленные границы генерируют внутреннее программное прерывание. В зависимости от того, за какую границу «окна» выходит текущее значения тока, вычислитель понижает или повышает ток в нагрузке. БКФ осуществляет коммутацию фаз двигателя, при этом скорость и направление вращения определяется частотой и последовательностью переключения ключей.

При реализации центрального вычислителя в виде однокристалльного контроллера применялся системный подход к организации архитектурных решений [4]. Например, основные модули выполнены на основе тройного резервирования, а интерфейсные контроллеры и внутрисистемные каналы связи поддерживают действующие стандарты в космической отрасли. Физическая реализация контроллера на базе радиационно-стойкого кристалла позволила достичь требований предъявляемым к электронным системам ответственного применения.

Таким образом, предложенный подход к системной организации однокристалльных вычислителей для модулей управления ИА позволил обеспечить высокую адаптируемость к решаемым задачам, малую занимаемую площадь и низкое энергопотребление. Малые массогабаритные показатели позволят осуществлять монтаж ЭСУ непосредственно в конструкции механического модуля ИА и достичь высокой надежности всей системы в целом.

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода, основанное на последних достижениях в области проектирования гибридных однокристалльных и однокорпусных систем, позволит разрабатывать радиационно-стойкие системы управления, совмещающие на одной подложке как цифровую, так и аналоговую часть. Такие системы позволят практически полностью отказаться от сложных схем в аналоговых трактах управления и перейти на принципиально новый уровень в разработке и производства ЭСУ для КА.

Библиографические ссылки

1. Павлов Д. А., Шиляев П. А., Коротков Е. В., Кривулин Н. О. Формирование нанокристаллического кремния на сапфире методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, Вып. 12. С. 16–22.
2. Грехов И. В., Костина Л. С. Структурные и электрические свойства подложек SiGe-на-изоляторе, сформированных методом прямого сращивания // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44, Вып. 8. С. 1135–1139.
3. Методы и алгоритмы микропрограммного управления быстродействующими импульсными ста-

билизаторами напряжения для организации питания бортовой аппаратуры перспективных космических аппаратов / О. В. Непомнящий, Е. А. Вейсов, Ю. В. Краснобаев, Д. В. Капулин // Вестник СибГАУ. 2010. № 4(25). С. 14–18.

4. Микроэлектронные устройства управления силовыми энергопреобразующими модулями систем электропитания перспективных космических аппаратов / О. В. Непомнящий, Ю. В. Краснобаев, С. Н. Титовский, В. А. Хабаров // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5, № 2. С. 162–168.

References

1. Pavlov D. A., Shilayev P. A., Korotkov E. V., Krivulin N. O. *Pisma v GTF*. 2010, 36 (12), p. 16–22.
2. Grehov I. V., Kostina L. S. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2010, 44 (8), p. 1135–1139.
3. Veisov E. A., Nepomnuashy O. V., Krasnobaev U. V., Kapulin D. V. *Vestnik SibGAU*. 2010, 4 (25), pp. 14–18.
4. Nepomnyashcy O. V., Krasnobaev J. V., Titovsky S. N., Habarov V. A. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2012, 5 (2), p. 162–168.

© Непомнящий О. В., Охоткин К. Г., Хабаров В. А., 2013

УДК 629.7.036

ЭЛАСТИЧНЫЕ ВЫТЕСНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

И. В. Платов

ФГУП «НПО имени С. А. Лавочкина»

141400, Россия, Московская область, Химки, ул. Ленинградская, д. 24. E-mail: ili061@mail.ru

В данной статье представлены результаты экспериментов, средств лабораторного обслуживания испытаний и исследований коррозионной стойкости, удобства использования материалов, узлов и агрегатов систем подачи с долгосрочным моделированием реального ресурса топливных баков с моделированием окружающей среды космической станции «Фобос-Грунт». Результаты испытаний показали, что при режимах полета перелетного модуля космического аппарата к концу полета следует ожидать газовыделение в баке с окислителем 0,16 л, в баке с горючим – 0,02 л при негерметичности эластичного вытеснительного устройства (ЭВУ) $1,0 \cdot 10^{-3}$ л·мм рт. ст./с. Работоспособность (конструктивная целостность) ЭВУ обеспечивает длительность полета перелетного модуля – 510 суток. Компоненты аминин и гептил до и после испытаний соответствовали требованиям нормативно-технической документации.

Ключевые слова: двигательная установка; испытания; материалы; узлы и агрегаты РКТ; воспроизведение воздействий реальных условий эксплуатации; имитация космических условий.

ELASTIC FEED SYSTEMS OF FUEL TANKS

I. V. Platov

Federal State Unitary Enterprise “SPA named after S. A. Lavochkin”

24 Leningradskaya str., Khimki, Moscow region, 141400, Russia. E-mail: ili061@mail.ru

The article presents the results of experiments, bench test facilities and studies of corrosion resistance, operability of materials, units and assemblies of feed systems with long-term simulation of real resource testing of fuel tanks with environment simulation of the space station «Fobos-Ground». The results of the tests showed that by the end of the flight under flight conditions of spacecraft transfer module the expected gassing in the tank with oxidizer should be 0.16 l, and 0.02 l in a tank with fuel, if the leakage of the elastic feed systems is $1,0 \cdot 10^{-3}$ l μm Hg/s. Efficiency (constructive integrity) provides for transfer module flight duration of 510 days. Amilin and heptyl components met the requirements of normative and technical documentation before and after the tests.

Keywords: propulsion system; testing; materials; spacecraft units and components; simulation of the actual operational environment; simulation of space environment.

В последние годы чрезвычайно возрос интерес к непосредственному исследованию планет солнечной системы. Для реализации данной задачи необходимы космические аппараты, способные, например, доставить оборудование для сбора информации о состоянии и составе грунта, наличии элементов, встречающихся на Земле и т.п. Таким образом, возрастают требования к оснащению перелетного модуля космического аппа-

рата (ПМ КА) связанные с длительностью космического перелета, в частности, определяющие работоспособность двигательной установки. Для обеспечения подачи жидких компонентов топлив к реактивным двигателям в условиях действия малой гравитации используются различные внутрибаковые разделительные устройства: металлические диафрагмы и сильфоны, эластичные вытеснительные устройства (ЭВУ) [1; 2].

Рассмотрим топливный бак сферической формы с установленным в него эластичным вытеснительным устройством, которое разделяет топливную и газовую полости бака (рис. 1). Отбор топлива из бака осуществляется через закрепленную с двух сторон перфорированную трубку. Газ наддува давит на поверхность ЭВУ и выдавливает топливо в магистраль.

Основные требования к ЭВУ при длительном отборе из них компонентов топлива следующие:

- конструктивная схема ЭВУ (топливо внутри или снаружи);
- низкая проницаемость газов через материал;
- химическая стойкость к компонентам;
- высокие прочностные характеристики материала (устойчивость к разрывам, растяжениям и т. д.).

Проведенные испытания по выбору формы и материала ЭВУ изготовленных в «НПО им. С. А. Лавочкина» образцов для штатных компонентов при длительном периоде эксплуатации позволили прийти к выводу об эффективности использования фольгированных материалов при сферической форме вытеснительного пакета.

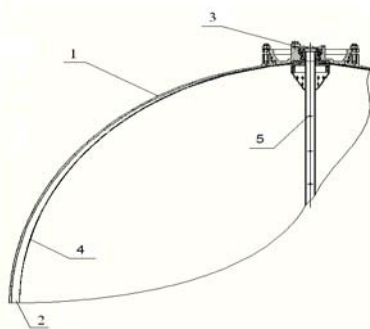


Рис. 1. Фрагмент топливного бака:
1 – корпус бака; 2 – наддувная полость; 3 – горловина;
4 – ЭВУ; 5 – перфорированная трубка

Материал ЭВУ состоит из полифеновой ткани, алюминиевой фольги и фторопластовых пленок, которые обеспечивают превосходную химическую стойкость и высокую эластичность. Полифеновая ткань снижает склонность материала к растрескиванию и улучшает стойкость к сложноизгибающим деформациям, а алюминиевая фольга снижает проницаемость газов наддува и КРТ (негерметичность фольгированного вытеснителя составляет $1,0 \cdot 10^{-3}$ л·мкм рт. ст./с., при незначительном увеличении массы ЭВУ).

Результаты проведенных испытаний по определению химстойкости материала ЭВУ при длительном нахождении в компонентах топлива приведены на рис. 2. Для придания пакету формы и габаритов внутреннего контура топливного бака ЭВУ изготавливается методом термической сварки из формованных сегментов (лепестков), которые свариваются в полусферы, а затем в сферу.

Для подтверждения работоспособности ЭВУ, оценки газовыделения на компонентах гептил и амилин в условиях натурной эксплуатации ДУ ПМ КА

«Фобос-Грунт» были сформулированы следующие задачи:

- определение значений концентраций растворенного газа наддува в амилине и гептиле в процессе длительного хранения и вытеснения компонента топлива из ЭВУ;
- определение газовыделения в процессе испытаний;
- определение степени негерметичности ЭВУ перед заправкой и после слива компонентов;
- оценка состояния материала ЭВУ после испытаний;
- определение соответствия НТД составов компонентов топлива до и после испытаний.

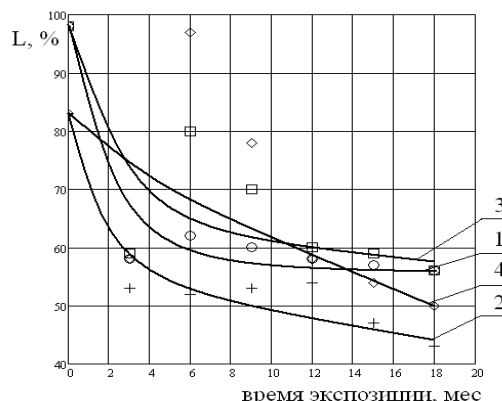


Рис. 2. Относительное удлинение фольгированного материала L после выдержки в гептиле и амилине:
1 (○○○) – гептил, вдоль; 2 (+++) – гептил, поперек;
3 (□□□) – амилин, вдоль; 4 (◇◇◇) – амилин, поперек

Для осуществления поставленных задач были разработаны программа и методика проведения испытаний, которые были реализованы в ФКП «НИЦ РКП» [3]. Испытуемый бак монтируется в термощкафу в соответствии с пневмогидравлической схемой изделия с добавлением емкости для объемно – весовых измерений при ресурсных испытаниях.

Осуществляется проверка герметичности ЭВУ до и после слива хромографическим методом. Проводится анализ по определению соответствия ГОСТам составов компонентов топлива до и после испытаний. Заправка осуществляется в откакумированные полости бака, ЭВУ и магистрали, заправка ЭВУ заданным количеством компонента с весовым контролем массы топлива. Не позднее одних суток осуществляется наддув гелием до рабочего давления.

В ходе ресурсных испытаний проводят отбор компонента из бака в измерительный бачок заранее откакумированный заданной массы компонента, определяемую по весам, выдерживают измерительный бачок в течение времени, необходимого для установления в нем постоянного давления, по значениям слитой в бачок массы компонента и давлению в бачке рассчитывают величину концентрации растворенного в компоненте газа. Содержимое измерительного бачка переливают в весовую емкость и продолжают слив из бака заданного циклограммой количества компонента.

На протяжении испытаний поддерживались температурные циклы, отвечающие натурным условиям

эксплуатации. На протяжении всего этапа испытаний осуществляется контроль температуры, давления, массы отобранных компонентов, а также контроль за состоянием пневмогидравлической системы.

По окончании ресурсных испытаний проводилось определение остатков компонента, герметичности ЭВУ. После мероприятий по нейтрализации проводится удаление ЭВУ из объема бака и внешний контроль состояния вытеснительного пакета на предмет обнаружения расслоений материала оболочки и сварных швов.

Согласно изложенной методике были проведены испытания для двух пар баков – с гептилом и амилином соответственно. Все сливы гептила из баков прошли без замечаний. Взятый по завершению испытаний анализ компонента соответствовал требованиям НТД. На рис. 3 показано газонасыщение гептила гелием.

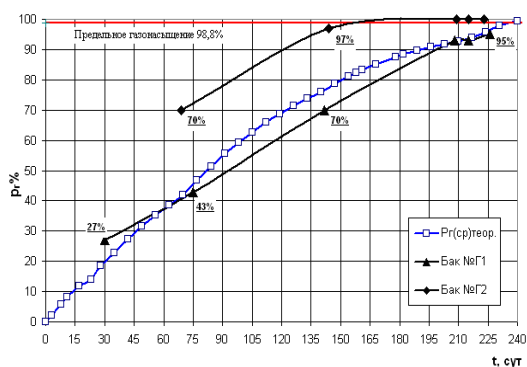


Рис. 3. Газонасыщение гептила гелием

Все сливы амилина из баков прошли также без замечаний. Взятый по завершению испытаний анализ компонента соответствовал НТД. На рис. 4 показано газонасыщение амилина гелием.

Определение исходной негерметичности по методу «мундштука» гелием показало отсутствие утечек через ЭВУ. После проведения испытаний была определена негерметичность ЭВУ баков № Г2 и № О2 также по методу «мундштука». Утечки азота через ЭВУ отсутствовали. При проверке методом «мундштука» на гелии утечки при перепаде на ЭВУ давления согласуются с требованиями по герметичности ЭВУ после испытаний – 0,0098 нсм³/мин.

Результаты измерений газонасыщения компонентов гелием в процессе длительного хранения в ЭВУ и сливов компонентов удовлетворительно согласуются с расчетными (см. рис. 3, 4).

Результаты испытаний показали, что при моделировании графика вытеснения компонентов к концу полета перелетного модуля космического аппарата «Фобос-Грунт» на 510 суток следует ожидать газовыделение в баке «О» – 0,16 л, в баке «Г» – 0,02 л при негерметичности ЭВУ $1,0 \cdot 10^{-3}$ л·ммк рт. ст./с. Компоненты амилин и гептил до и после испытаний соответствовали требованиям ОСТ 113-03-503-85 и ГОСТ В 17803-72 соответственно. Исследования механических свойств образцов материала ЭВУ после

выдержки в компонентах топлива показали, что относительное удлинение фольгированного материала составляет ~ 40 %, при этом сварные швы и основной материал сохранили свои свойства.

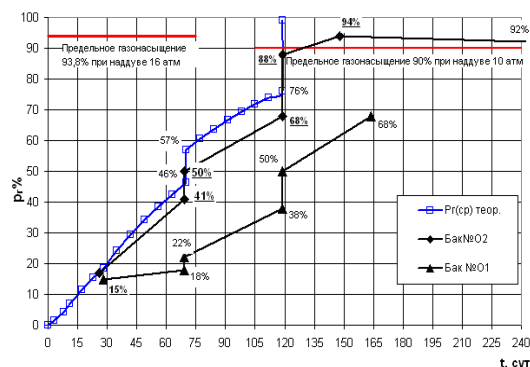


Рис. 4. Газонасыщение амилина гелием

Работоспособность (конструктивная целостность) ЭВУ обеспечивает длительность полета ДУ ПМ – 510 суток.

Библиографические ссылки

1. Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями / под ред. академика В. Н. Челомея. М. : Машиностроение, 1978. 240 с.
2. Корсаков В. С., Шморгунов А. В., Платов И. В. Эластичные вытеснительные устройства топливных баков // Инновационный арсенал молодежи 2011 : тр. II науч.-техн. конф. ФГУП «КБ Арсенал», Санкт-Петербург, 26–28 октября 2011. С. 122–125.
3. Создание стендовой базы, технологий стендовых испытаний и отработка в ФКП «НИЦ РКП» ракетно-космической техники ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина» / Г. Г. Сайдов, К. П. Денисов, В. Н. Кучкин и др. // Вестник ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина». 2012. № 4. С. 147–153.

References

1. *Pnevmohydraulicheskie sistemi dvigatel'nykh ustanovok s gidkosiimi raketnimi dvigatelemi* (Pneumohydraulic systems of engine plants with liquid rocket engines). Edited by academician V. N. Chelomey. Moscow, Mashinostroyeniye, 1978, 240 p.
2. Korsakov V. S., Shmorgunov A. V., Platov I. V. Elastic feed systems of fuel tanks [Elastichnie vitesnitel'nie ustroystva toplivnix bakov]. *Trudy 2 nauchno-texnicheskoy konferencii FGUP "CB Arsenal" "Innovacionniy arsenal molodegi 2011"* (Proc. 2th youth scientific and technical conference "innovative youth arsenal 2011"), Saint-Petersburg, 26–28 October 2011, p. 122–125.
3. Saydov G. G., Denisov K. P., Kuchkin V. N., Borisov V. V., Korsakov V. S., Mitrofanov V. F., *Vestnik FSUE "Lavochkin association"*, 2012, № 4, p. 147–153.

УДК 621.396

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПСЕВДОДАЛЬНОСТЕЙ В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ

В. Н. Тяпкин¹, Ю. Л. Фатеев², Т. Г. Шарфунова³, А. С. Курносов², П. В. Штро²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: tyapkin58@mail.ru

²Сибирский федеральный университет, Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 28

³ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52.

Уменьшение погрешности измерений псевдодальности – одна из основных задач, решаемых в высокоточной аппаратуре, работающей по сигналам ГНСС. В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований современной высокоточной аппаратуры ГНСС, определены основные источники погрешности измерений псевдодальности. Показано, что современные методы обработки сигналов НКА в навигационной аппаратуре позволили уменьшить случайную погрешность измерения псевдодальности до единиц сантиметров при измерении по открытым сигналам ГНСС. Совершенствование эфемеридно-временного обеспечения ГНСС, успехи в компенсации ионосферной и тропосферной погрешности вывели на первый план такие составляющие погрешности как погрешность многолучевого приема и систематическая погрешность в аналоговых трактах приемной аппаратуры.

Рассмотрены методы уменьшения погрешности многолучевости для некоторых применений высокоточной НАП и варианты калибровки систематической погрешности НАП.

Ключевые слова: спутниковая навигация, погрешность измерения, псевдодальность, фильтрация, ионосфера, коррекция, эксперимент, синхронизация.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF PSEUDORANGES MEASUREMENT ERRORS IN NAVIGATION RECEIVER WITH PHASED ARRAY

V. N. Tyapkin¹, Yu. L. Fateev¹, T. G. Sharfunova², A. S. Kurnosov¹, P. V. Shtro¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: tyapkin58@mail.ru

²Siberian Federal University, Institute of Engineering Physics and Radioelectronics
28 Kirenskiy str., Krasnoyarsk, 660074. Russia

³JSC “Information Satellite Systems” named after academician M. F. Reshetnev
52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

The main problem to be solved during the development of high-precision GNSS equipment is the reduction of the positioning error. The article describes the experimental results for high-precision navigation equipment. The experiment identified the main sources of pseudorange measurement error. Modern processing methods of satellite signals allow to reduce the pseudorange measurement random error to a few centimeters. Such errors as the ionosphere and troposphere, ephemeris error, and the error of GNSS time support may be excluded from the consideration. Therefore, the main components of positioning error are multipath error and bias error in the analog paths of the receiving equipment.

The methods of the multipath error reduction and calibration options for bias error of navigation equipment are examined.

Keywords: satellite navigation, measurement error, pseudorange, filtration, ionosphere correction experiment synchronization.

Технологии координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) успешно внедряются в различные области экономики и оборонного комплекса, при этом расширение сферы применения определяет растущие требования к точности КВНО. Федеральной целевой программой «Поддер-

жание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» предусматривается существенное повышение точности эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС с обеспечением дециметрового уровня погрешности координат [1]. Повышенные требования к погрешности измерения кодовой и фазовой

псевдодальности предъявляются в специализированной высокоточной аппаратуре [2–6], работающей по сигналам ГНСС:

- приемная аппаратура беззапросных измерительных систем (БИС), используемых в контуре ЭВО ГЛОНАСС;
- опорные станции дифференциальной коррекции;
- станции мониторинга навигационного поля КНС;
- аппаратура частотно-временной синхронизации (АЧВС), обеспечивающая высокоточное воспроизведение эталонной ШВ и опорной частоты по сигналам ГНСС;

На современном этапе развития методов обработки сигналов НКА в навигационной аппаратуре потребителя (НАП), случайная погрешность измерения кодовой псевдодальности по открытым сигналам ГНСС уменьшена до единиц сантиметров [7; 8]. Ионосферная и тропосферная погрешности в ряде высокоточных приложений (геодезическая аппаратура, угломерная НАП, АЧВС), предусматривающих одновременный прием сигналов НКА в нескольких точках пространства и реализацию относительных измерений, в значительной мере компенсируются за счет малых пространственных градиентов данных погрешностей. Для высокоточной НАП, работающей в абсолютном режиме (БИС, АЧВС), компенсация ионосферной погрешности обеспечивается с использованием измерений сигналов НКА в нескольких частотных диапазонах, а также при реализации одночастотных подходов к определению ионосферной погрешности [9–11]. Эффективное уменьшение тропосферной погрешности для этих приложений обеспечивается с применением измерителей метеопараметров, включая радиометры водяного пара, а также при использовании «слепых» моделей тропосферной задержки.

В качестве иллюстрации достигнутого на сегодняшний день уровня погрешности кодовых и фазовых измерений можно привести экспериментальные результаты, полученные на макете высокоточной БИС нового поколения выполненной на основе цифровой антенной решетки.

Структура макета цифровой антенной решетки (МЦАР) приведена на рис. 1. Аналоговая часть МЦАР состоит из 8-ми антенных модулей с подключенными к ним радиотрактами. Сигналы с радиотрактов поступают на АЦП, и далее на цифровую часть макета.

Цифровая часть содержит 12 независимых каналов обработки сигналов L1, L2, ГЛОНАСС. Каждый канал состоит из диаграммообразующей схемы (ДОС) и цифрового канала обработки сигналов.

Диаграммообразующая схема представляет собой весовой сумматор сигналов, поступающих с 8-ми аналоговых трактов. Весовые коэффициенты K1...K8 задаются из вычислителя и формируются исходя из заданной диаграммы направленности. В частности, в режиме высокоточных измерений весовые коэффициенты подбираются так, чтобы скомпенсировать разность хода полезного сигнала между антеннами, т. е. на сумматор полезные сигналы поступают с одной фазой.

Для оценки случайной составляющей погрешности измерений МЦАР по навигационным сигналам НКА использовались разностные методы, в которых оценка случайной погрешности определяется по разности параметров, измеренных на два независимых однотипных устройства, которые синхронизированы от одного стандарта частоты и времени.

ДОС можно сконфигурировать так, чтобы в отдельном канале обработки данных использовалась только часть антенн, для этого нужно для неиспользуемых антенн установить весовые коэффициенты, равные нулю. В частности, можно сделать так, чтобы каждый канал цифровой обработки принимал сигналы с разных антенн, и таким образом получить до 8-ми полностью независимых приемных трактов. При этом эти приемные тракты полностью синхронизированы, поскольку работают от единого синтезатора опорных сигналов.

Аналогично, можно создать независимые приемные тракты, которые работают с отдельными антенными решетками, состоящими из 2-х или 4-х антенн. Оценка случайной составляющей погрешности измерений проводится по реальным сигналам НКА. Для оценки СКО случайной составляющей погрешности кодовых измерений формируются выборки между разностями одномоментных одночастотных кодовых измерений МЦАР для каждого диапазона частотного интервала не менее 30 минут:

$$\Delta S_i^j = S_{1i}^j - S_{2i}^j, \quad (1)$$

где i – номер измерения, j – номер НКА, S – измеренный навигационный параметр.

Случайная составляющая погрешности измерений

$$\sigma^j = \sqrt{\frac{1}{N_j - 1} \sum_{i=1}^{N_j} (\Delta S_i^j - \overline{\Delta S^j})^2}, \quad (2)$$

где $\overline{\Delta S^j}$ – среднее арифметическое параметра (1);

N_j – количество измерений в сеансе для j -го НКА.

Эксперимент по сравнению псевдодальностей, измеренных по сигналам с различных элементов антенной решетки. Эксперимент проводился 4–5 марта 2013 г. В нулевой канал приемника подавался суммарный сигнал со всех элементов антенной решетки, с формированием луча в направлении на космический аппарат. Каналы приемника № 1 – № 8 были подключены каждый к одному из элементов антенной решетки А0–А7, соответственно. Все каналы приемника были настроены на прием сигнала ГЛОНАСС с литерой –3.

Конфигурация антенной системы приведена на рис. 2. Траектория космического аппарата в системе координат азимут-угол места приведена на рис. 3.

На рис. 4 и 5 приведена разность фазовых и кодовых псевдодальностей, полученных по сигналам с антенн А2 и А1, усредненная на интервале 30 секунд и угол места НКА. Разность псевдодальностей приведена с учетом компенсации разности хода.

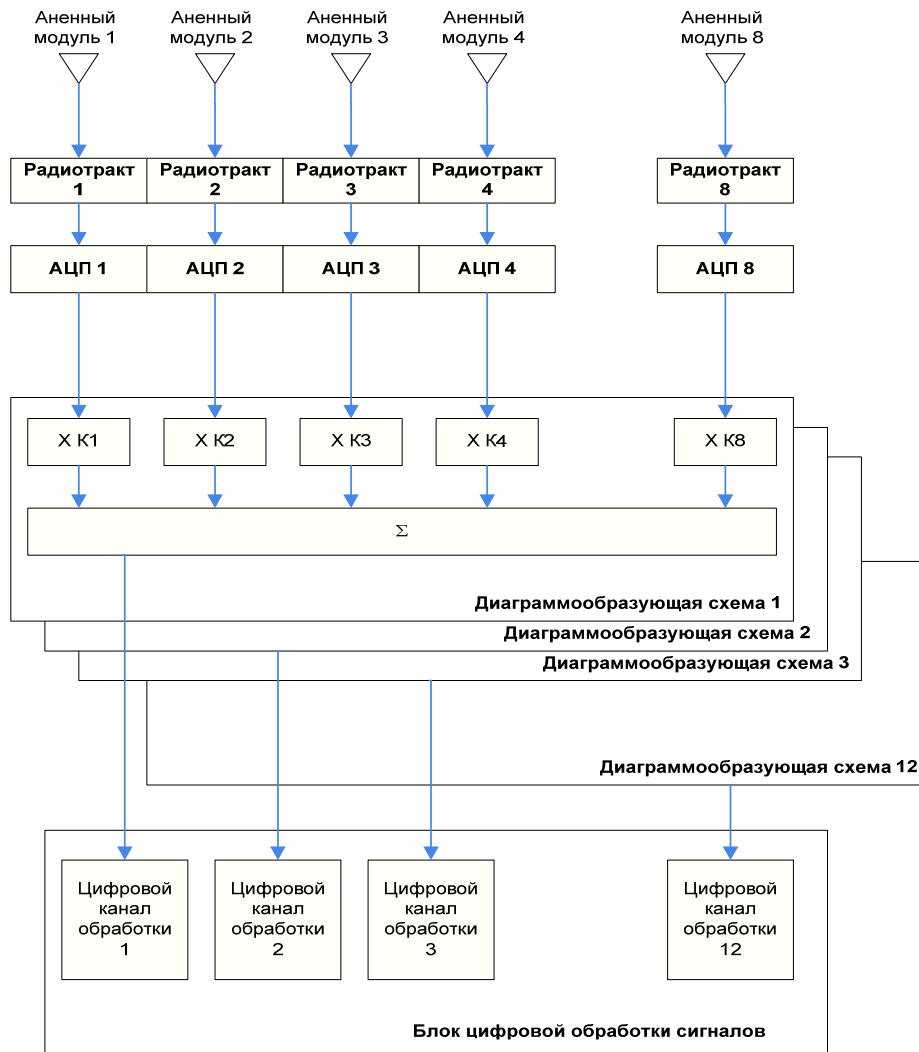


Рис. 1. Структурная схема навигационного приемника МЦАР

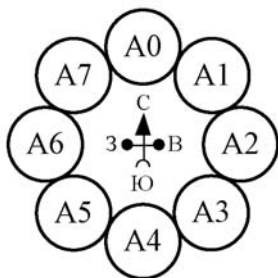


Рис. 2. Конфигурация антенной системы

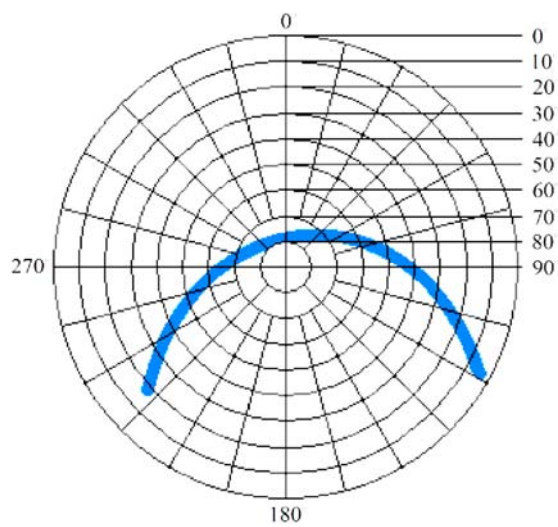


Рис. 3. Траектория космического аппарата в системе координат азимут-угол места

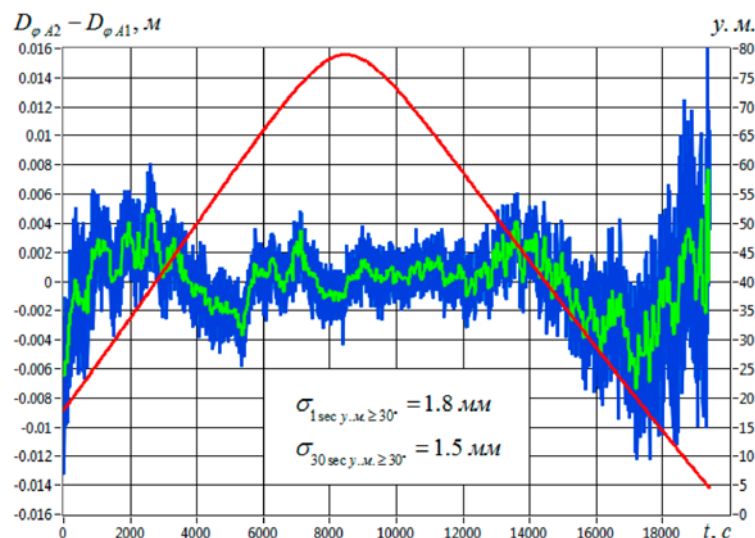


Рис. 4. Разность фазовых псевдодалностей, измеренных по сигналам с антенн A2 и A1:
 ■ – полученная по сигналам с антенн A2 и A1; ■ – усредненная на интервале 30 с; — – угол места НКА

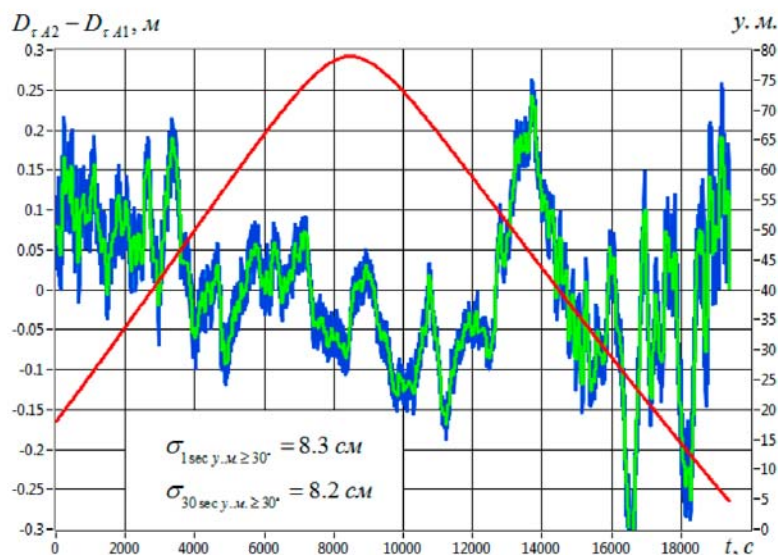


Рис. 5. Разность кодовых псевдодалностей, измеренных по сигналам с антенн A2 и A1:
 ■ – полученная по сигналам с антенн A2 и A1; ■ – усредненная на интервале 30 с; — – угол места НКА

Таким образом на полном пролете СКО разности фазовых псевдодалностей двух полукомплектов работающих на отдельные антенны составило 4 мм. Погрешность фазовой псевдодалности одного полукомплекта будет в $\sqrt{2}$ раз меньше и составит 2,8 мм.

Разности кодовых псевдодалностей двух полукомплектов работающих на отдельные антенны составило 10 см. Погрешность фазовой псевдодалности одного полукомплекта будет в $\sqrt{2}$ раз меньше и составит 7,07 см.

Аналогично были проведены эксперименты в режиме измерений по антенным решеткам, состоящей из двух антенн и четырех антенн.

Кроме того были получены результаты измерений между двумя полукомплектами штатной БИС выпус-

каемой серийно МРК-33М. Все результаты испытаний сведены в таблицу.

Эксперимент по определению погрешности многолучевости. Устранение ошибок многолучевости для любых задержек обеспечивается использованием оптимальных алгоритмов, основанных на пространственно-временных различиях основного и отраженного сигналов. В целом, проблема многолучевости стоит весьма остро, ее решению посвящается большое число проводимых в настоящее время исследований.

Постановка задачи эксперимента. В аппаратуре измеряется псевдодалность, измеренная по коду и фазе несущей частоты. Многолучевой прием оказывает различное влияние на кодовые и фазовые измере-

ния – погрешность фазовой псевдодальности, вызванная многолучевостью, намного меньше погрешности кодовой псевдодальности. Поскольку сама псевдодальность одна и та же для кодовых и фазовых измерений, то разность кодовой и фазовой псевдодальности будет отражать погрешность многолучевости кодовых измерений.

Погрешности измерения псевдодальностей

Вариант полуконспекта антенной решетки	Погрешность измерения псевдодальности, мм	
	ПСВД	Фаза
Одиночные антенны	70,7	2,8
Антенная решетка с двумя антеннами	99,0	1,1
Антенная решетка с четырьмя антеннами	84,0	0,84
Полуконспекты МРК-33	224,6	9,5

В то же время нужно учесть, что фазовая псевдодальность измеряется с точностью до постоянной величины, обусловленной неоднозначностью фазовых измерений в начальный момент времени. Кроме того, ионосферная погрешность для кодовых и фазовых измерений равна по величине и противоположна по знаку. Для устранения ионосферной погрешности используются двухчастотные измерения, а для устранения фазовой неоднозначности – рассматривается приращение разности кодовой и фазовой псевдодальностей.

Задачей эксперимента является сравнение параметра определяемого выражением (3) рассчитанного по ИТНП измеренных аппаратурой МРК-33М и макетом цифровой антенной решетки приемника МРК-37 с 4-х элементной антенной системой в режиме формирования лучей

$$Z(CT) = \left[C1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (C2 - C1) \right] - \left[L1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot (L2 - L1) \right]. \quad (3)$$

В выражении (3): C1 и C2, кодовые псевдодальности измеренные на частотах f_1 и f_2 по коду стандартной точности, единицы измерения метры, L1 и L2, фазовые псевдодальности измеренные на частотах f_1 и f_2 , единицы измерения метры.

Измерения проводились в период с 16:06 12.11.2012 по 06:00 13.11.2012 (МДВ) в Сибирском федеральном университете. На рис. 6 приведена схема включения.

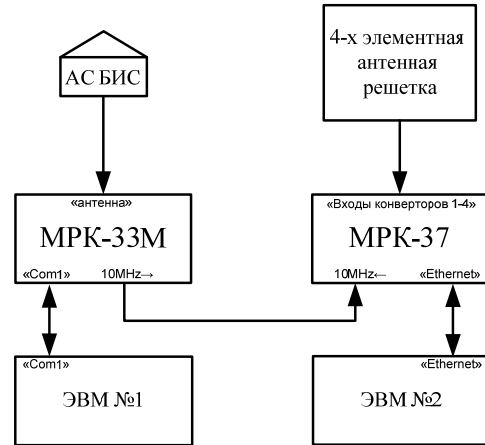


Рис. 6. Схема включений при проведении эксперимента

На рис. 7 представлены экспериментальные результаты для НКА ГЛОНАСС с совпадающей гринвичской долготой в период наблюдения.

Сравнение результатов расчета параметра Z по формуле (3) на основе ИТНП, полученных аппаратурой МРК-33М и МЦАР показывает существенно более лучшие точностные характеристики аппаратуры МЦАР.

Таким образом, полученные на МЦАР экспериментальные данные позволяют сделать выводы о необходимости применения в новых комплектах БИС антенных решеток, которые позволят наряду с повышением помехоустойчивости обеспечить требования, предъявляемые к новому поколению БИС.

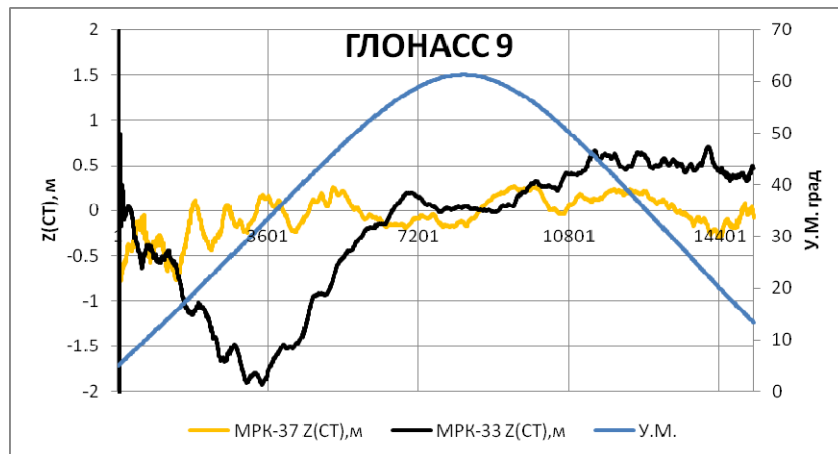


Рис. 7. Параметр Z(CT) для НКА ГЛОНАСС № 9

Библиографические ссылки

1. Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 гг. : Федеральная целевая программа : [утв. постановлением Правительства РФ № 189 от 03.03.2012]. М., 2012.
2. Создание сети БИС для эфемеридно-временного обеспечения системы «ГЛОНАСС» / В. А. Бартенев, А. В. Гребенников, А. К. Гречкосев и др. // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека : сб. тезисов Всерос. науч.-техн. конф. Железнодорожск, 2007.
3. Жуков А. Н., Пасынков В. В., Титов Е. В. Достижение конкурентоспособного уровня эфемеридного обеспечения системы ГЛОНАСС // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека : сб. тезисов 2-й Междунар. науч.-техн. конф. Железнодорожск, 10–14 октября 2012 г. 195 с.
4. Сушкин И. Н. Применение ГНСС ГЛОНАСС и GPS для оценки электронной концентрации в ионосферном слое F для предсказания и регистрации землетрясений // Известия вузов. Физика. 2008. Т. 51, № 9/3. С. 214–217.
5. Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС : монография. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. 260 с.
6. Калибровка измерительного тракта для испытания навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем / В. Н. Тяпкин, Ю. Л. Фатеев, Д. Д. Дмитриев, В. Г. Коннов // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 139–142.
7. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. 4-е изд., перераб. / под ред. А. И. Перов, В. Н. Харисов. М. : Радиотехника, 2010.
8. Гребенников А. В. Совместная фильтрация кодовых и фазовых измерений в высокоточной аппаратуре радионавигации // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 118–128.
9. Казанцев М. Ю., Фатеев Ю. Л. Определение ионосферной составляющей погрешности измерения псевдодальности в одночастотной аппаратуре систем ГЛОНАСС и GPS // Журнал радиоэлектроники : электронный журнал 2002, № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec02/index.html>.
10. Казанцев М. Ю. Уменьшение погрешности навигационных измерений в одночастотной аппаратуре потребителя систем ГЛОНАСС и GPS за счет учета влияния ионосферы : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.04 : Красноярск, 2003. 150 с. РГБ ОД, 61:04-5/3721
11. Пат. №2313103 Российская Федерация. Способ одночастотного определения задержки сигналов навигационной спутниковой системы в ионосфере / Сушкин И. Н.; опубл. 20.12.2007 Бюл. № 35.

References

1. *Podderzhanie, razvitie i ispol'zovanie sistemy GLONASS na 2012–2020 gody : Federal'naya tselevaya programma: [utv. postanovleniem Pravitel'stva RF № 189 ot 03.03.2012]* (Maintain, develop and use the GLONASS system for 2012-2020 : Federal program [ratified. Government Decree № 189 of 03.03.2012]) Moscow, 2012.
2. Bartenev V. A., Grebennikov A. V., Grechkoseev A. K. et al. *Sb. tezisov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"*. (Navigation satellite systems, their role and importance in the life of modern man. Mon. Abstracts of All-Russian. scientific and engineering conf.). Zheleznogorsk. 2007.
3. Zhukov A. N., Pasyнков V. V., Titov E. V. *Sb. tezisov 2-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Navigatsionnye sputnikovye sistemy, ikh rol' i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"* (Navigation satellite systems, their role and importance in the life of modern man. Mon. theses of the 2nd Int. scientific and engineering conf.). 10–14 oct. 2012, Zheleznogorsk, 195 p.
4. Sushkin I. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2008, 51 (9/3), p. 214–217.
5. Tyapkin V. N., Garin E. N. *Metody opredeleniya navigatsionnykh parametrov podviznykh sredstv s ispol'zovaniem sputnikovoy radionavigatsionnoy sistemy GLONASS* (Methods of navigation parameters of the mobiles using the GLONASS satellite navigation system). Krasnoyarsk, Sib. feder. un-t, 2012. 260 p. ISBN 978-5-7638-2639-.
6. Tyapkin V. N., Fateev Yu. L., Dmitriev D. D., Konnov V. G. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 4 (44), p. 139–142.
7. GLONASS. *Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS. The principles of construction and operation). Moscow, Radiotekhnika, 2010.
8. Grebennikov A. V. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*. 2012, № 9, p. 118–128.
9. Kazantsev M. Yu., Fateev Yu. L. *Zhurnal radioelektroniki*, 2002, № 12, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/dec02/index.html>.
10. Kazantsev M. Yu. *Umen'shenie pogreshnosti navigatsionnykh izmereniy v odnochastotnoy apparature potrebitelya sistem GLONASS i GPS za schet ucheta vliyaniya ionosfery. Dis. kand. tekhn. nauk : 05.12.04* (Reducing uncertainty navigation measurements in a single frequency consumer equipment GLONASS and GPS systems by taking into account the influence of the ionosphere. Dis. ... candidate tehn. sciences: 05.12.04). Krasnoyarsk, 2003, 150 p. RGB OD, 61:04-5/3721
11. Sushkin I. N. *Sposob odnochastotnogo opredeleniya zaderzhki signalov navigatsionnoy sputnikovoy sistemy v ionosfere* (Pat. Number 2313103 Russian Federation . Method of determining the single-frequency signals delay satellite navigation system in the ionosphere), publ. 20.12.2007, Bull. Number 35.

УДК 681.3:629.7

РАЗРАБОТКА АППАРАТУРЫ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА*

В. Х. Ханов, А. В. Шахматов, С. А. Чекмарев, М. Ю. Вергазов, Ф. А. Лукин

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

Описываются основные технические решения и результаты разработки аппаратуры информационного обмена бортового комплекса управления для малого космического аппарата. Определена типовая структура аппаратуры информационного обмена. Обоснованы основные технические решения, к которым относятся использование только открытых продуктов и технологий, сетевая архитектура на базе технологии SpaceWire с использованием спецификации SxPA, элементная база на базе программируемых логических интегральных схем. Разработаны три типа устройств: маршрутизирующий коммутатор SpaceWire, однокристальный бортовой компьютер на процессоре Leon3, модуль расширения интерфейсов. Представлены внешний вид разработанных устройств, их основные характеристики. Устройства аппаратуры информационного обмена отличаются высокой функциональностью и производительностью, малыми габаритами, низким энергопотреблением. Аппаратура информационного обмена прошла процедуру приемочных испытаний и передана заказчику.

Ключевые слова: малые космические аппараты, бортовой комплекс управления, сетевая архитектура, отработанный комплект аппаратуры бортового комплекса управления.

DEVELOPMENT OF THE INFORMATION EXCHANGE SYSTEM EQUIPMENT FOR THE SMALL SPACECRAFT ONBOARD CONTROL UNIT

V. Kh. Khanov, A. V. Shahmatov, S. A. Chekmaryov, M. Yu. Vergazov, F. A. Lukin

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

This paper describes the main engineering solutions and results of the information exchange system for the small spacecraft onboard control unit design. The structure of the information exchange system has been determined. Main engineering solutions have been substantiated including usage of the open source products and technologies, network architecture based on SpaceWire with SxPA, with the use of FPGA. Three types of devices have been designed: SpaceWire routing switch, single-chip onboard computer based on LEON3 processor, interface extension unit. The exterior of the developed devices and their main characteristics are presented. The devices of the information exchange system are of rich functionality, high performance, small size and low power consumption. The information exchange system was tested and delivered to the customer.

Keywords: small spacecrafts, onboard control complex, network architecture, onboard control complex design, onboard control complex experimental model.

Создание малых космических аппаратов в последнее время приобрело характер массового явления. За последние пять лет в мире запущено более 100 микро и нано-спутников и в ближайшие годы прирост малых космических аппаратов (МКА) будет только увеличиваться. В нашей стране также развивается спутнико-строение МКА, примером которого являются микро-спутники «Юбилейный», «Чибис-М», «МиР», «Аист». Среди многих достоинств микроспутников, обеспечивающих их популярность, можно выделить возможность в условиях низкого финансового риска выполнить летную отработку новых перспективных техни-

ческих решений, которые впоследствии можно будет использовать на космических аппаратах (КА) больших и средних классов. Малый финансовый риск определяется невысокой стоимостью разработки, создания, испытаний, запуска и эксплуатации МКА.

Одним из таких перспективных технических решений является сетевая технология SpaceWire [1]. Данная технология разработана по инициативе Европейского космического агентства для замены низкоскоростных интерфейсов передачи данных на борту КА и организации полноценной сети передачи данных.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.B37.21.0451 «Исследование и разработка сетевой архитектуры бортового комплекса управления малого космического аппарата».

В мире насчитывается более 20 успешных проектов применения технологии SpaceWire, в России примеров применения данной технологии в летной практике пока нет.

В СибГАУ накоплен значительный опыт наземно-экспериментальной отработки технологии SpaceWire [2; 3], разработаны и изготовлены отработочные образцы каналаобразующей аппаратуры SpaceWire. В 2012 г. к СибГАУ обратилась компания «Спутникс» для разработки аппаратуры системы информационного обмена бортового комплекса управления (БКУ) на базе технологии SpaceWire.

Компания «Спутникс» ведет разработку микро-спутниковой платформы ТаблетСат массой до 50 кг с использованием, так называемого модульного принципа и архитектуры Plug-and-Play. Это принцип позволяет из типовых служебных систем собственной разработки и полезной нагрузки заказчика собирать спутники по принципу LEGO-конструктора. Подход основан на использовании открытых SxPA-спецификаций (SPUTNIX Plug-and-Play Architecture), описывающих механические, электрические, и информационные интерфейсы между служебными системами и полезной нагрузкой. Данные спецификации доступны для всех желающих на сайте компании [4]. Базовой единицей конструкции платформы ТаблетСат является модуль массой около 10 кг, получивший название 1U (U-от английского слова UNIT, т. е. модуль). Другие типовые размеры (2U, 3U, 4U) с большим резервом по массе и электрической мощности под полезную нагрузку могут выполняться посредством увеличения количества однотипных модулей формата 1U.

Отметим, что SxPA-спецификации имеют открытый, а, следовательно, развивающийся характер. К моменту обращения в СибГАУ в SxPA-спецификациях была проработана лишь общая концепция, реального воплощения, как в аппаратной, так и в программной части на тот момент еще не имеющей. Таким образом, перед СибГАУ стояла задача воплотить и верифицировать идеи компании «Спутникс», создав аппаратуру информационного обмена (АИО) бортового комплекса управления МКА.

Анализ предъявленных в техническом задании требований к АИО микро-спутника «ТаблетСат» позволил сформулировать и уточнить основные технические решения.

Следуя общей концепции платформы ТаблетСат, как открытой системы, принято решение применять только открытые технологии и продукты. К числу основных открытых технологий используемых в проекте следует отнести:

- использование только стандартизированных интерфейсов и сетей: межблочная аппаратурная сеть SpaceWire, внутриблочный интерфейс AMBA;
- использование только открытых сложно-функциональных блоков (IP-блоков): софт-процессор Leon 3, кодеки интерфейсов SpaceWireLight и CAN;
- использование только открытых операционных систем: операционной системы реального времени RTEMS.

Платформа ТаблетСат откосится к классу микро-КА. Это обстоятельство определяет крайне жесткие требования к энергопотреблению и массогабаритным показателям. Для удовлетворения этим требованиям использована мезонинная конструкция устройств АОИ, основная элементная база имеет BGA-исполнение корпусов и исполнение (модификацию) с минимальным потреблением. Кроме того, учитывая реальный дефицит электрической энергии на борту микро-спутника, реализована коммутация электропитания устройств, подключаемых к АОИ.

В качестве основной элементной базы реализации устройств проекта были определены программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Данное решение приводит не только к снижению габаритов, массы и энергопотребления устройств, но и позволяет многократно модифицировать функционал аппаратуры без изменения ее конструкции. Для того, чтобы приблизить отработочный комплект к летному, применены многократно программируемые ПЛИС Actel семейства АЗРЕ. Данные ПЛИС имеют радиационно-стойкие аналогии с гарантированной работоспособностью до 30 кРад, что более чем достаточно для микро-КА. Остальная элементная база не имеет радиационно-стойких аналогов, что вполне допустимо для низкоорбитальных КА с маленьким сроком активного существования (к каким относятся микро-спутники), и позволяет снизить стоимость аппаратуры.

Основополагающим проектным решением стало применение сетевой технологии SpaceWire. Применение SpaceWire обосновывается двумя ключевыми требованиями к АИО:

- модульность и масштабируемость информационной инфраструктуры при наращивании U-блоков ТаблетСат;
- поддержка SxPA-спецификаций для подключения внешних устройств к АИО.

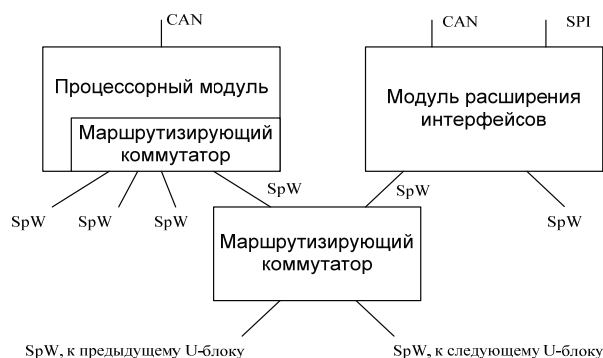


Рис. 1. Типовая структура аппаратуры информационного обмена

SpaceWire как и любая сетевая технология полностью удовлетворяет требованию масштабируемости. Модульность реализуется минимальной типовой структурой АИО для любого U-блока, представленной на рис. 1. Типовая структура АОИ U-блока, состоит из маршрутизирующего коммутатора, процессорного модуля и модуля расширения интерфейсов. Обяза-

тельным модулем для каждого U-блока является маршрутизирующий коммутатор, который определяет обязательную инфраструктуру сети SpaceWire (SpW). Остальные модули являются не обязательными и включаются в инфраструктуру сети при необходимости. Процессорный модуль подключается к сети, если в U-блоке необходим вычислитель для служебных систем или аппаратуры пользователя. Модуль расширения интерфейсов необходим в случае преобразования интерфейсов SpW ↔ CAN, SpW ↔ SPI, SpW ↔ I2C. Очевидно, что полная конфигурация, представленная на рис. 1 всегда присутствует в системообразующем блоке платформы IU-блока, состав остальных блоков может быть разным. Подобная реализация модульности и масштабирования позволяет говорить, что в каждом U-блоке создается собственная подсеть SpW с переменным составом аппаратуры, а в целом сеть платформы ТаблетСат имеет вид структурированной сетевой архитектуры.

Спецификация SxPA – это Plug-and-Play архитектура, основным назначением которой является быстрое агрегирование и конфигурирование подсистем микроспутников с использованием принципа Plug-and-Play. Данный принцип обеспечивает возможность подключать устройство к системе без его предварительной подготовки и подготовки самого БКУ, т. е., обеспечивается автоматизированный процесс распознавания устройств и обмена данными между ними [4]. С целью упрощения реализации SxPA в созданном отработочном комплекте АИО функции Plug-and-Play переложены на программный уровень. Аппаратный уровень в соответствии со спецификацией SxPA предоставляет соединительные компоненты, вычислительные и другие аппаратные средства, посредством которых программное обеспечение SxPA реализует свои функции. Для этого каждое устройство, реализующее SxPA, имеет собственный процессор и память. Например, модуль расширения интерфейсов имеет усеченный вариант процессора Leon 3.

Как уже выше отмечалось, сетевая инфраструктура платформы ТаблетСат состоит из всего трех типов устройств:

- маршрутизирующий коммутатор SpW на 4 внешних порта с функцией коммутации питания подключаемых к маршрутизатору устройств

- однокристального процессорного модуля (бортового компьютера), состоящего из процессора Leon 3, встроенного маршрутизатора SpW с 4-мя внешними портами, интерфейсами CAN и Ethernet в одной ПЛИС;

- модуля расширения интерфейсов (многофункционального моста), SpW ↔ CAN, SpW ↔ SPI, SpW ↔ I2C.

Внешний вид разработанных устройств показан на рис. 2. Остановимся более подробно на каждом устройстве отдельно. Основные характеристики маршрутизирующего коммутатора представлены в табл. 1. Устройство состоит из 2-х плат: одна является собственно маршрутизирующим коммутатором, другая плата выполняет функции коммутации электропитания внешних для коммутатора устройств. Команды для выполнения подключения или отключения внешних устройств передаются от модуля процессора. Для этого может быть использован протокол RMAP, аппаратно реализованный (RMAP-target) в каждом узле SpW. Плата коммутации питания, кроме своей основной функции, осуществляет контроль тока, напряжения на коммутируемой линии и температуры коммутирующего ключа. Мезонинная конструкция устройства позволила снизить габариты маршрутизируемого коммутатора.

Самым сложным устройством АИО является процессорный модуль, характеристики которого представлены в табл. 2. В нем в одной ПЛИС ActelA3PE 3000 размещены, как собственно, сам процессор, так и маршрутизирующий коммутатор на 4 внешних порта. Характеристики встроенного маршрутизатора совпадают с маршрутизируемым коммутатором, изготовленным в виде отдельного устройства. В качестве процессора использован открытый реконфигурируемый софт-процессор Leon 3, рекомендованный ЕКА для новых космических проектов. Системное программное обеспечение, а также тесты и примеры применения процессорного модуля разработаны под операционную систему реального времени RTEMS.

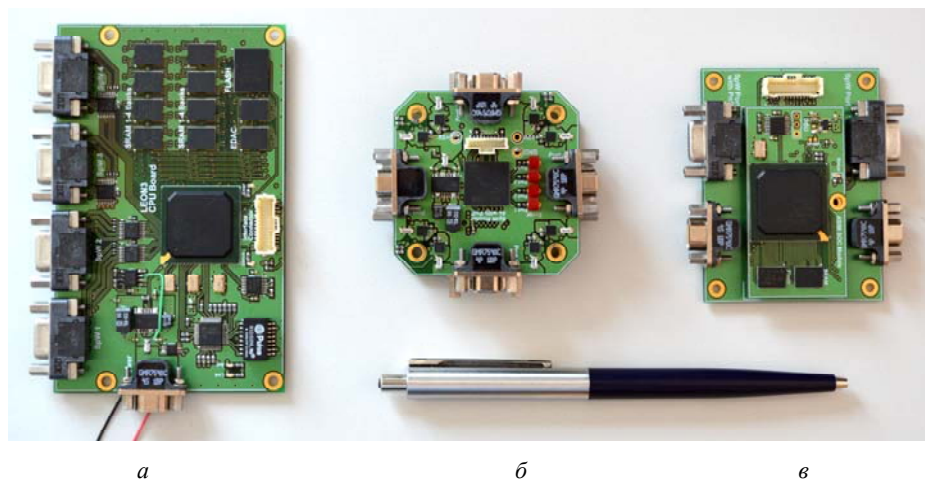


Рис. 2. Внешний вид аппаратуры информационного обмена без корпусов:
а – процессорный модуль; б – маршрутизирующий коммутатор; в – модуль расширения интерфейсов

Таблица 1

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Количество внешних портов SpW	шт.	4
Скорость SpW	Мбит/с	от 10 до 100
Коммутируемые напряжения	В	5, 12
Напряжение питания	В	5
Потребление с 4-мя активными SpW	А	0,14
Габариты печатной платы	мм	55x55

Таблица 2

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Тип процессора		Leon 3, без FPU
Тактовая частота	МГц	25
Емкость ОЗУ	Мбайт	16
Емкость ПЗУ (flash)	Мбайт	8
Количество внешних портов маршрутизир. коммутатора	шт.	4
Скорость SpW	Мбит/с	от 10 до 100
Скорость CAN 2.0	Мбит/с	до 1
Скорость Ethernet	Мбит/с	10/100
Напряжение питания	В	5
Потребление:	А	
без подключения Ethernet		0,2
с активным Ethernet		0,3
Габариты печатной платы	мм	115x109

Таблица 3

Параметр	Единица измерения	Значение параметра
Количество узлов SpW	шт.	2
Количество выходов CAN 2.0	шт.	1
Количество выходов SPI	шт.	1
Тип процессора		Leon 3 с тактовой частотой 25 МГц, ОЗУ 2048 Кбайт, ПЗУ 256 Кбайт
Скорость SpW	Мбит/с	от 10 до 100
Скорость CAN 2.0	Мбит/с	до 1
Напряжение питания	В	5
Потребление:	А	
без активного CAN		0,14
с активным CAN		0,2
Габариты печатной платы	мм	70x65

Процессорный модуль имеет дополнительные внешние интерфейсы: CAN и Ethernet. Ethernet является отладочным интерфейсом и не будет использоваться во время космической миссии. Интерфейс CAN имеет большую популярность среди разработчиков микроспутников, поэтому он был включен в процессорный модуль для возможного подключения аппаратуры внешних разработчиков. Применение BGA-корпусов позволило снизить габариты печатной платы процессорного модуля.

Модуль расширения интерфейсов служит для сопряжения системного интерфейса SpW к интерфейсам внешних устройств подключаемым к АИО. В настоящее время реализованы преобразования SpW $\leftrightarrow$ CAN, SpW $\leftrightarrow$ SPI, SpW $\leftrightarrow$ I2C. В дальнейшем возможно расширение подключаемых внешних интерфейсов. Это-

му способствует концепция модуля, состоящего из двух плат: вычислительной платы и платы внешних соединителей. Вычислительная плата посредством программного обеспечения производит преобразование данных принятому по одному интерфейсу в другой. Плата внешних соединителей предоставляет физические соединители для подключения внешних устройств по необходимым интерфейсам. Таким образом, заменяя плату внешних соединителей одну на другую с другим количеством и типами интерфейсов, не изменяя при этом конструкцию платы вычислителя, можно расширить номенклатуру подключаемых к АИО внешних устройств. Основные характеристики модуля расширения интерфейсов представлены в табл. 3. В качестве вычислителя использована усеченная версия софт-процессора Leon 3. Таким обра-

зом, вся аппаратура АОИ использует один и тот же процессор, что создает дополнительные удобства в работе.

Отработанный комплект АИО прошел этап приемосдаточных испытаний, подтвердив при этом соответствие предъявленным в техническом задании требованиям, и передан заказчику.

В настоящее время «Сканекс» проводит разработку бортового программного обеспечения, а СибГАУ, как разработчик аппаратуры, оказывает техническую поддержку.

Таким образом, в результате проведенных работ определены основные технические решения, разработана, изготовлена, испытана и передана заказчику аппаратура системы информационного обмена бортового комплекса управления малого космического аппарата ТаблетСат. Запуск первого микроспутника-демонстратора серии ТаблетСат запланирован на конец 2014 г.

Библиографические ссылки

1. Шейнин Ю., Солохина Т., Петричкович Я. Технология SpaceWire для параллельных систем и бортовых распределенных комплексов // *Электроника* : НТБ. 2006. № 5. С. 64–75.
2. Сетевая архитектура бортового комплекса управления / Д. А. Никитин, В. Х. Ханов, М. Ю. Вер-

газов, С. А. Чекмарев // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения УКИ-12 : тр. рос. конф. М. : ИПУ РАН, 2012. С. 1539–1546.

3. Сетевая архитектура сопряжения комплексов бортового оборудования космического аппарата / В. Х. Ханов, А. В. Шахматов, М. Ю. Вергазов, С. А. Чекмарев // *Вестник СибГАУ*. 2012. № 4 (44). С. 148–151.

4. Спутникс [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sputnix.ru/ru/technologies> (дата обращения: 25.08.2013).

References

1. Sheinin Yu., Solokhina T., Petrichkovich Ya. *Elektronika, NTB*, 2006, no. 5, p. 64–75.
2. Nikitin D. A., Khanov V. Kh., Vergazov V. Yu., Chekmarev S. A. *Materialy nauchnoy konferentsii "Tehicheskie i programnye sredstva sistem izmereniya i kontrolya UKI-12"*. Moscow, IPU RAN, 2012, p. 1539–1546.
3. Khanov V. Kh., Shahmatov A. V., Vergazov V. Yu., Chekmarev S. A. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 4 (44), p. 148–151.
4. Sputniks, available at: <http://www.sputnix.ru/ru/technologies> (accessed 25 August 2013).

© Ханов В. Х., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Вергазов М. Ю., Лукин Ф. А., 2013

УДК 629.78

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

Е. Н. Якимов¹, В. А. Раевский², М. В. Лукьяненко²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: yen@iss-reshetnev.ru.

²Сибирский аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

Рассмотрены актуальные вопросы исследования системы управления ориентацией космического аппарата (КА) с учетом того, что антенный блок КА специального назначения имеет большие габаритные размеры. По результатам синтеза системы управления ориентацией КА на высокоэллиптической орбите принято решение устанавливать антенны на корпусе неподвижно, а панели батареи солнечной (БС) должны быть подвижны относительно корпуса КА. Предложено применять электромеханические исполнительные органы (ЭМИО) не имеющие скрытого кинетического момента, а в качестве исполнительных органов, создающих внешние моменты, использовать реактивные двигатели. Для разворота панелей БС относительно корпуса КА необходимо использовать два привода БС, разгрузку ЭМИО необходимо осуществлять с помощью электромагнитных устройств (ЭМУ). Ориентация на Солнце и на Землю будет осуществляться по информации с оптико-электронных приборов.

Ключевые слова: система управления ориентацией, батарея солнечная, орбитальная система координат, степень свободы, кинетический момент, внешний момент, антенно-фидерная система, электромеханические исполнительные органы, электромагнитные устройства.

SYNTHESIS OF THE VEHICLE ORIENTATION CONTROL SUBSYSTEM AT THE HIGH ELLIPTIC ORBIT

E. N. Yakimov¹, V. A. Raevskiy², M. V. Lukyanenko²

¹JSC “Academician M. F. Reshetnev” Information Satellite Systems”

52 Lenin street, Zheleznogorsk, Krasnoyarskiy Region, 662972, Russia. E-mail: yen@iss-reshetnev.ru.

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

The article dwells upon the actual issues of the analysis of the control subsystem of a satellite with the account of the antenna unit being of high overall dimensions. According to the results of the synthesis of the vehicle orientation control subsystem of a highly elliptical satellite there came the decision to mount the antenna unit fixed stiff on the satellite and the solar array sections to rotate around the satellite body. It is proposed to utilize electromechanical servo-units that have no hidden angular moment and jet engines as servo-units producing external moments. Two drives should be used to rotate the solar array sections around the satellite body. Electromagnetic devices should be used to unload the electromechanical servo-units. The orientation on the Sun and the Earth is implemented with help of electro-optical sensors.

Keywords: vehicle orientation control subsystem, solar array, orbital coordinate system, degree of freedom, angular moment, external moment, antenna feeder, electromechanical servo-units, electromechanical servo-units.

КА специального назначения должен обладать на орбите большой энергетикой и многометровой антенно-фидерной системой. Масса КА и подвижных элементов соизмеримы, а весовые ограничения, обусловленные средствами выведения, требуют применения легкой конструкции, имеющей поэтому очень малую жесткость.

В связи с тем, что антенный блок КА имеет большие габаритные размеры, принято устанавливать антенны на корпусе неподвижно, чтобы постоянно следить поверхностью фотопреобразователей за Солнцем.

При этом панели БС должны быть подвижны относительно корпуса КА. Следовательно, одна из осей КА в рабочем режиме должна с высокой точностью ориентироваться на Землю. При ориентации КА в орбитальной системе координат панели БС должны иметь две степени свободы, что усложняет конструкцию КА, приводит к затенению БС антенными отражателями и создает сложность с обеспечением тепловых режимов. Если ограничить подвижность БС одной степенью свободы, возникает необходимость ориентации плоскости КА, перпендикулярной оси вращения БС, относительно направления на Солнце, т. е. к так называемой Солнечно-Земной ориентации. На основании выше изложенного принято решение использовать приводы БС с одной степенью свободы.

При такой ориентации угол разворота нормали к поверхности БС составляет от -90 до $+90$ градусов. Электрическую связь панелей с корпусом КА можно осуществлять как через гибкий кабель, так и с помощью токосъемного устройства. При прохождении участков орбиты, на которых угол Солнце-объект-Земля (СОЗ) близок к 180 градусам (большие углы СОЗ), скорость вращения плоскости СОЗ превышает скорость, которая может быть реализована относительно оси, ориентированной на Землю с помощью исполнительных органов. За счет этого увеличивается

погрешность ориентации на Солнце. Уменьшение этой погрешности достигается разворотом КА относительно указанной оси с упреждением (КА начинает разворачиваться до прохождения точки максимального угла СОЗ). При прохождении теневых участков Земли (малые углы СОЗ) осуществляется разворот КА относительно той же оси и панелей БС таким образом, чтобы при выходе из тени Земли нормаль к поверхности БС была ориентирована на Солнце, т. е. в рабочем состоянии КА должен постоянно вращаться в инерциальном пространстве. Поэтому необходимо применять ЭМИО, которые не имеют скрытого кинетического момента. В качестве исполнительных органов, создающих внешние моменты, используются реактивные двигатели. Для разворота панелей БС относительно корпуса КА используются два привода БС. Разгрузка ЭМИО осуществляется с помощью ЭМУ. Ориентация на Солнце и Землю осуществляется по информации с оптико-электронных приборов [1; 2].

Конструктивная схема, связанные оси и некоторые характерные размеры КА показаны на рис. 1, 2.

Для функционирования системы ориентации и стабилизации (СОС) необходимы следующие чувствительные элементы:

- измеритель угловых скоростей по каждой из осей КА для успокоения КА после отделения от ракеты-носителя и проведения начальных режимов;
- оптико-электронные приборы, по информации с которых возможно проведение ориентации на Солнце и Землю;
- гироскопический прибор для штатной ориентации.

Анализ показывает, что все задачи ориентации КА специального назначения на выбранной орбите решаются звездным визирующим прибором, и приборами ориентации на Землю и Солнце.

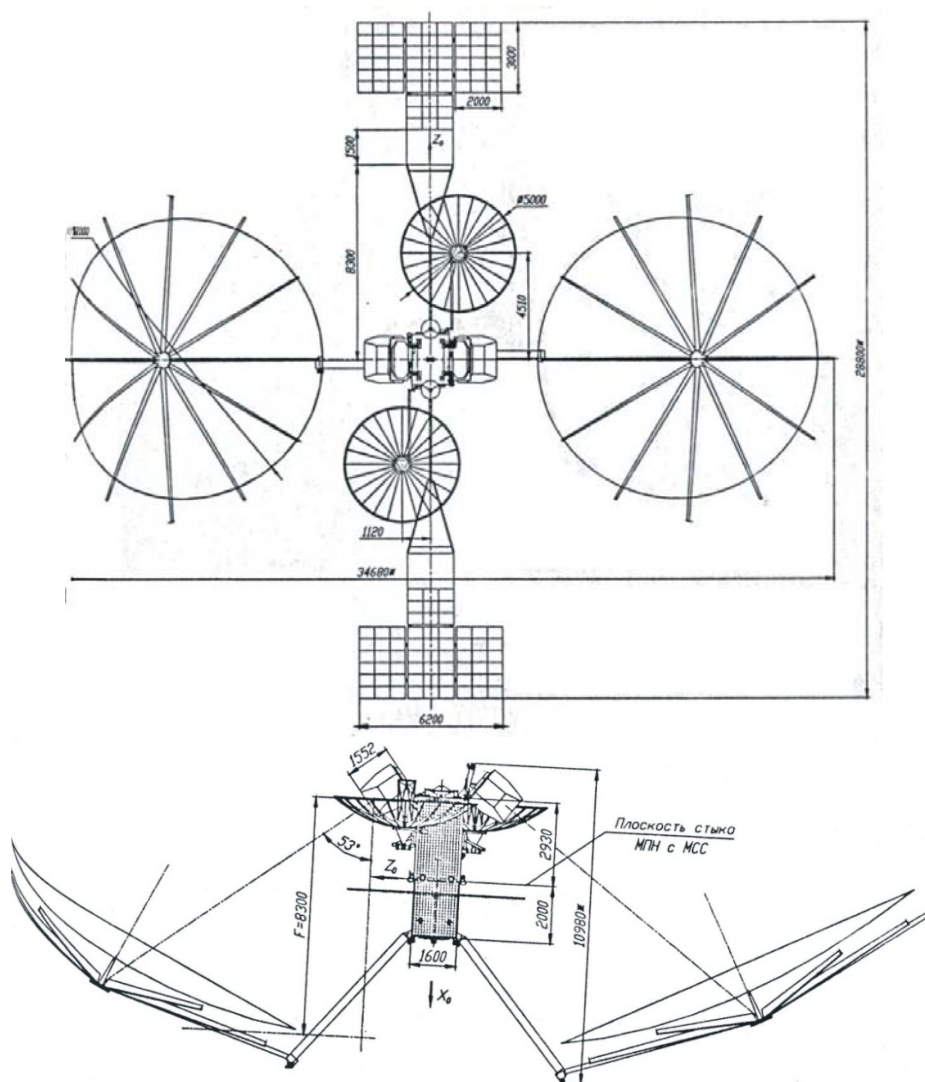


Рис. 1. Конструктивная схема КА

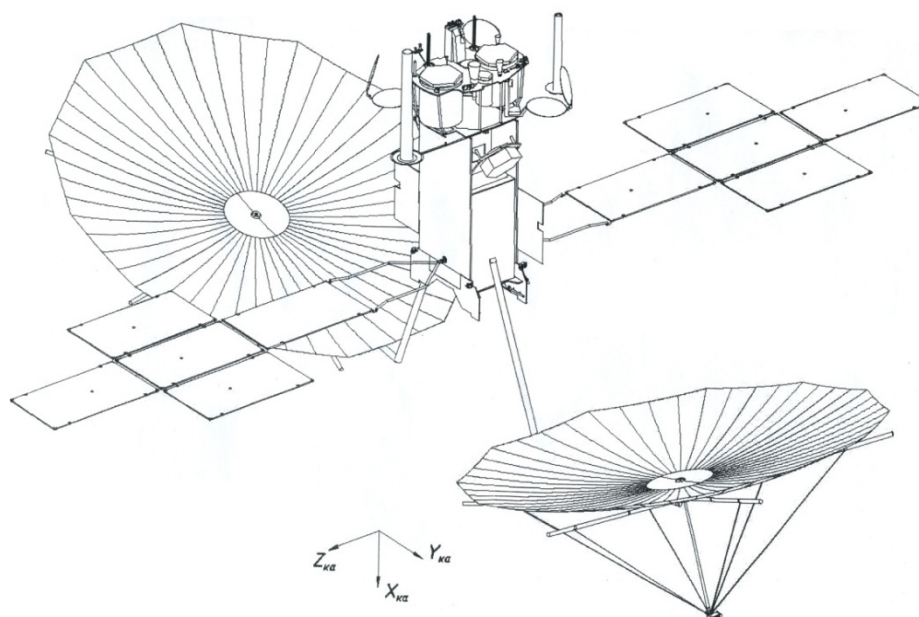


Рис. 2. Космический аппарат с раскрытыми элементами конструкции

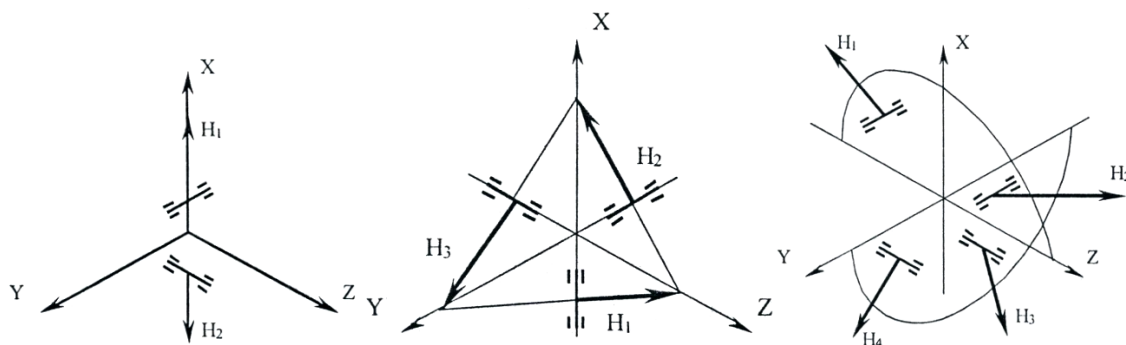


Рис. 3. Гиродинамические схемы

Характеристики ЭМИО с использованием УДМ и ГД

Характеристика ЭМИО	При использовании УДМ	При использовании ГД
Количество УДМ (ГД), шт.	6	4
Управляющий момент относительно оси, Н·м	0,4–0,6	2
Кинетический момент, Н·м·с	70	200
Масса, кг	84	90–120

Основные характеристики ЭМИО с использованием УДМ и ГД приведены в таблице.

Так как ЭМИО не должны иметь скрытого кинетического момента, можно применить: управляющие двигатели-маховики (УДМ) или двухступенные гиросtabilизаторы (гиродины) ЭМИО, которые парируют внешние возмущающие моменты, обеспечивая необходимую скорость относительно осей OY , OZ при прохождении перигейного участка орбиты, обеспечивают необходимую скорость относительно оси OX при прохождении малых и больших углов CO_3 , и необходимую скорость относительно осей OY и OZ при ориентации КА, а также относительно осей OX и OZ при ориентации перед проведением коррекции орбиты и восстановлении ориентации на Землю после ее проведения. Приемлемую массу аппарата реализовать, без разгрузки накапливаемого кинетического момента с помощью геомагнитного поля, невозможно.

Разгрузка ЭМИО должна осуществляться электромагнитами. ЭМУ при прохождении перигея, где индукция магнитного поля Земли имеет достаточную величину.

Угловая скорость разворота $\omega_{\text{хп}}$ КА относительно оси OX при упреждающем развороте определяется по формуле: $\omega_{\text{хп}} \geq \dot{E}$, где $\dot{E}$ – средняя орбитальная скорость во время разворота.

Ориентацию перед проведением коррекции предполагается проводить путем разворота КА относительно нормали к плоскости орбиты до совмещения оси OX с направлением вектора линейной скорости КА (максимальный угол разворота $\sim 180^\circ$) с одновременным отслеживанием плоскостью XOY направления на Солнце.

Проведен сравнительный анализ ЭМИО на основе УДМ с тремя и шестью маховиками а также ЭМИО на основе гиродина (ГД) [3]. Рассмотрены двух, трех и четырех гиродинамические схемы (рис. 3).

При использовании двух УДМ по одному каналу в штатном режиме возможен алгоритм прохождения точки нулевого кинетического момента:

- при создании положительного момента по оси на первый УДМ подается управляющее воздействие соответствующее этому моменту, второй УДМ при этом стабилизируется на некоторой небольшой величине кинетического момента противоположного знака;
- при создании отрицательного момента первый УДМ тормозится до уровня стабилизации, при этом второй УДМ находится в режиме стабилизации, после чего начинается выдача управляющих воздействий на второй УДМ. При этом, ни один УДМ не проходит через нуль кинетического момента.

Использование двух УДМ по каналу ориентации при работе по целевому назначению позволяет смещать диапазон рабочих скоростей УДМ путем задания необходимого уровня стабилизации. Тем самым смещается диапазон частот возмущающих моментов, действующих на КА со стороны УДМ. Возможно смещение диапазона рабочих скоростей УДМ по каждому из каналов ориентации по заданной программе.

В системе ориентации применен гироскопический прибор, позволяющий решать следующие задачи:

- управление штатной ориентацией с периодической калибровкой по информации с прибора звездного (ПЗВ);
- управление ориентацией при проведении коррекции орбиты;
- управление штатной ориентацией с калибровкой по информации с прибора ориентации на Солнце (ПОС) и прибора ориентации на Землю (ПОЗ);
- управление при проведении разгрузки ЭМИО с использованием гравитационного и магнитного полей Земли;
- управление при прохождении перигейного участка орбиты.

В качестве гиросприбора применен блок интегрирующих гироскопов (БИГ), дающий информацию об угловых скоростях КА с высокой точностью. В составе СОС необходимо устройство поворота БС (УПБС) с двумя приводами и ЭМУ для разгрузки ЭМИО.

Схема расположения приборов СОС относительно связанной системы координат показана на рис. 4.

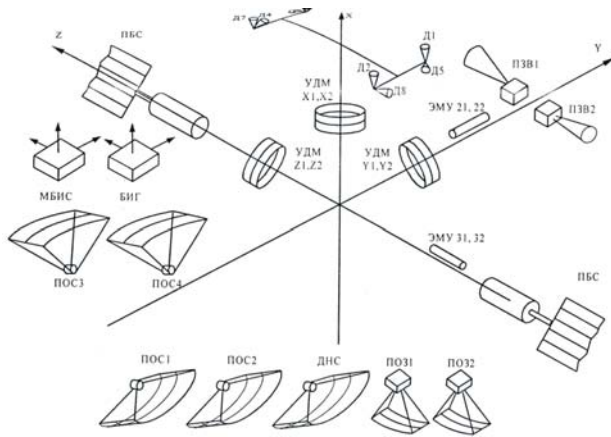


Рис. 4. Схема расположения приборов СОС

Разработана логика работы СОС. Режим успокоения (РУ) предназначен для гашения начальных угловых скоростей. Чувствительным элементом в РУ является датчик угловой скорости (ДУС), а исполнительными органами двигатели ориентации двигательной установки. Критерием окончания РУ является отсутствие угловых скоростей по каналам OX , OY и OZ .

Режим начальной солнечной ориентации (РНСО) предназначен для ориентации нормалей к поверхности БС на Солнце. РНСО делится на два подрежима: режим начальной ориентации на Солнце оси минус OX (РНСОХ) и режим начальной ориентации на Солнце оси минус OY (РНСОУ).

В РНСОХ обеспечивается ориентация на Солнце оси минус OX , по которой направлены нормали к поверхности БС после раскрытия. Чувствительными элементами в РНСОХ являются ДУС и ПОС, а исполнительными органами УДМ.

В РНСОХ осуществляется разворот с поисковой скоростью относительно оси OY при поддержании скоростей близкими к нулю, по осям OZ и OX до попадания Солнца в поле зрения подключенного к управлению ПОС, последующая ориентация оси минус OX на Солнце и отслеживание осью минус OX этого направления. В процессе приведения оси минус OX на Солнце и отслеживания осью минус OX этого направления по информации с ПОС вычисляются углы отклонения проекции направления на Солнце на плоскость YOZ от оси OZ , на плоскость XOZ от оси минус OY и на плоскость XOY от оси минус OX для управления относительно осей OX , OY и OZ .

При выходе Солнца из поля зрения ПОС по каналу управления относительно оси OY формируется управляющий момент на возвращение Солнца в поле зрения ПОС по знаку угла отклонения перед выходом Солнца из поля зрения ПОС. При этом по каналам

управления относительно осей OZ и OX обеспечивается гашение скорости.

В РНСОУ осуществляется разворот панелей БС из положения, в котором нормали к плоскости БС совпадают с осью минус OX , в положение, в котором нормали к поверхности БС совпадают с осью минус OY , с одновременным отслеживанием нормальными к поверхности БС направления на Солнце. Чувствительными элементами для реализации алгоритма управления в РНСОУ являются блок измерения скорости (БИС) и ПОС. В качестве исполнительных органов в РНСОУ используются УПБС и УДМ.

В режиме начальной ориентации на Землю (РНОЗ) обеспечивается поиск Земли при сохранении ориентации оси минус OY на Солнце, последующая ориентация оси минус OX на Землю. В процессе ориентации и отслеживания направления на Землю поддерживается ориентация панелей БС на Солнце. Чувствительными элементами в РНОЗ являются БИС, ПОС и ПОЗ. В качестве исполнительных органов используются УПБС и УДМ.

В РНОЗ при проведении поиска Земли определяются углы отклонения проекций направления на Солнце в плоскостях КА. По каналам управления относительно осей OX и OZ управление осуществляется так же как в РНСО. Панели БС в процессе поиска неподвижны. По каналу управления относительно оси OY управление обеспечивается вращением КА с постоянной скоростью по информации с БИС. При попадании Земли в поле зрения ПОЗ прекращается вращение по оси OY , к управлению относительно осей OY и OZ подключается ПОЗ, разрешается включение УПБС по разностному сигналу между углом с ПОС и углом поворота БС, измеряемыми в плоскости XOY от оси минус OY .

Далее осуществляется приведение оси минус OX к центру Земли путем разворотов КА относительно осей OY , OZ с помощью УДМ по сигналам с ПОЗ, удержание нормалей к поверхности БС в направлении на Солнце путем разворотов КА относительно оси OX с помощью УДМ по сигналам с ПОС и разворотов нормалей к поверхности БС по разности между углом с ПОС и углом поворота БС при помощи УПБС.

В режиме ориентации на Землю (РОЗ) обеспечивается ориентация оси минус OX на заданную точку земной поверхности, ориентация плоскости XOY относительно направления на Солнце и ориентация нормалей к плоскости панелей БС на Солнце.

В качестве чувствительных элементов в РОЗ используются БИГ, ПОС, ПОЗ и ПЗВ. В качестве исполнительных органов используются ЭМИО и УПБС. В РОЗ для проведения разгрузки УДМ используются ЭМУ. Информация с ПЗВ используется для калибровки БИГ.

В РОЗ предполагается использовать необходимую информацию: матрицы перехода между геоцентрической и орбитальной, геоцентрической и солнечно-земной, геоцентрической и смещенной солнечно-земной и геоцентрической и солнечной системами координат, а также текущий аргумент широты, теку-

щий угол между осью OY_0 орбитальной системы координат и проекцией направления на Солнце на плоскость OZ_0Y_0 орбитальной системы координат, текущий угол СОЗ (Солнце-КА-точка С на поверхности Земли), время прохождения максимального угла СОЗ, угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце, скорость вращения плоскости СОЗ, время входа в тень Земли (Луны), время выхода из тени Земли (Луны), угол между осью OY_0 и проекцией направления на Солнце на плоскость OZ_0Y_0 на время входа в тень Земли и выхода из тени Земли.

Управление УПБС осуществляется поворотом по сигналу разности между углом с ПОС в плоскости XOY и углом поворота БС, поступающим с соответствующей схемы измерения угла устройства поворотных панелей.

Прохождение малых и больших углов СОЗ осуществляется с разворотом КА вокруг оси OX . При прохождении больших углов СОЗ формируется упреждающий разворот относительно оси OX до момента прохождения максимального угла СОЗ. При угле между осью OX и направлением на Солнце меньше заданного значения выполняются следующие действия:

- определяется угол в плоскости орбиты между текущим положением КА и положением КА в момент прохождения максимального угла СОЗ;
- определяется угол разворота относительно оси OX в процессе движения по орбите от текущего положения КА до точки прохождения максимального угла СОЗ, в которой ось OY должна быть перпендикулярна плоскости орбиты;
- определяется время разворота по оси OX на указанный выше угол, при заданной скорости разворота вокруг оси OX ;
- определяется время прохождения по орбите угла от текущего положения до точки прохождения максимального угла СОЗ;
- как только время необходимое для разворота вокруг оси OX на вычисленный угол разворота становится больше времени прохождения по орбите угла от текущего положения КА до точки прохождения максимального угла СОЗ, формируется признак больших углов СОЗ и признак на упреждающий разворот КА относительно оси OX .

Одновременно ПОС отключается от управления по каналу относительно оси OX . Скорость разворота и угол разворота при упреждающем развороте контролируются по информации с БИГ. Выключение упреждающего разворота осуществляется после прохождения больших углов СОЗ при угле между плоскостью XOY и плоскостью СОЗ меньше заданного значения. Далее ориентация осуществляется по алгоритму РОЗ, описанному ранее.

Малые углы СОЗ характеризуются наличием тени Земли. Приближение теневого участка определяется путем сравнения измеренного с помощью ПОС угла между осью минус OX и давлением на Солнце с угловым размером Земли, если угол между плоскостью

орбиты и направлением на Солнце меньше углового размера Земли.

Управление по оси OX во время прохождения тени Земли осуществляется по информации с БИГ. При входе в тень осуществляется разворот КА относительно оси OX на такой угол, чтобы после выхода из тени Земли Солнце находилось в плоскости XOY со стороны оси – OY . Требуемый угол разворота может вычисляться по информации, получаемой с приборов СОС. Текущий угол поворота определяется по информации с БИГ. После выхода из тени Земли управление по оси OX осуществляется по информации с ПЗВ, контроль за ориентацией на Солнце осуществляется по информации с ПОС.

При ориентации в режиме проведения коррекции (РПК) орбиты осуществляется совмещение оси OX КА с вектором линейной скорости КА и отслеживание этого направления при сохранении ориентации плоскости XOY относительно направления на Солнце.

Чувствительными элементами в РПК являются БИГ и ПОС, а исполнительными органами ЭМИО и ракетные двигатели ориентации.

В РПК предусматривается установка панелей БС нормальными к поверхности БС параллельно оси OX КА. При этом установка нормали к поверхности БС по оси OX (минус OX) производится таким образом, чтобы угол между направлением на Солнце и нормальными к поверхности БС на момент установки был меньше 90 градусов.

Анализ действующих на КА возмущений показывает, что величина импульса тяги реактивных двигателей, необходимая для работы СОС в течении необходимого срока активного существования, значительно превышает величину запаса рабочего тела, предусмотренного на борту, исходя из возможностей существующих средств выведения КА. Установка дополнительных баков также повлечет за собой большое увеличение массы КА и усложнение конструкции.

Требуемый импульс тяги можно уменьшить, предусмотрев магнитную разгрузку ЭМИ. Для обеспечения магнитной разгрузки в состав СОС должны входить электромагнитные устройства, позволяющие формировать магнитные моменты относительно связанных осей OX и OZ . Использование магнитной разгрузки эффективно только в области перигея орбиты. Определено, что формирование магнитных моментов ЭМУ будет осуществляться при значениях угла истинной аномалии от 0 до 70° и от 290° до 360°.

Магнитная разгрузка обеспечивает полную разгрузку импульса внешних возмущающих моментов за виток, исключая его накопление с течением времени, а дополнительный вес ЭМУ на порядок меньше веса сэкономленного рабочего тела двигателей. Кроме того, дополнительно проработано применение гравитационной разгрузки за счет отклонения КА на перигейном участке орбиты на углы до 45° по каналам крена и тангажа. Знак отклонения определяется знаком накопленного кинетического момента. При наличии разности между моментами инерции КА по осям

OX , OY , OZ это приведет к появлению механического момента, направленного на разгрузку ЭМИО.

Исследована так же схема разгрузки накопленного кинетического момента, совпадающего с направлением на Солнце за счет эффекта радиационного пропеллера, получаемого путем разворота панелей БС относительно оси OZ на углы 5° – 10° в противоположные стороны от направления на Солнце. Данный метод разгрузки применим на всех участках орбиты.

Библиографические ссылки

1. Раевский В. А., Якимов Е. Н. Дополнение к эскизному проекту по теме 11Ф141, 2004.
2. Техническое задание на гиродин ГД-02-150(771.ТЗ) / Е. Н. Якимов и др. 2003.

3. Лукьяненко М. В., Раевский В. А., Якимов Е. Н. Анализ динамики системы ориентации и стабилизации упругого космического аппарата с гироскопическим комплексом на основе гиродинов ГД-02-150 // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 143–153.

References

1. Raevskiy V. A., Yakimov E. N. *Dopolneniye k eskiznomu proyektu po teme 11F141* (The supplement to the draft design of the 11Ф141 project), 2004.
2. Yakimov E. N. and et. al. *Tekhnicheskoye zadaniye na girodin GD-02-150 (771.TZ)* (Requirements specification on the ГД-02-150 (771.ТЗ) gyrodyne), 2003.
3. Lukyanenko M. V., Raevskiy V. A., Yakimov E. N. // *Vestnik SibGAU*, 2013, № 2 (48), p. 143–153.

© Якимов Е. Н., Раевский В. А., Лукьяненко М. В., 2013

РАЗДЕЛ
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.372.543.2

ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИЙ ФИЛЬТР СО СВЕРХШИРОКОЙ ПОЛОСОЙ ЗАГРАЖДЕНИЯ И УРОВНЕМ ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХ БОЛЕЕ 100 ДБ*

Я. Ф. Бальва¹, А. М. Сержантов², С. А. Ходенков¹, В. В. Иванин¹, В. А. Шокиров¹

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

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

Предложены миниатюрные конструкции полоскового резонатора на двухслойной подвешенной подложке и полосно-пропускающих фильтров на его основе. Фильтры обладают широкой полосой заграждения с высоким уровнем затухания в ней. Экспериментальный фильтр четвертого порядка с относительной шириной полосы пропускания 5 % имеет полосу заграждения по уровню –100 дБ до частоты более чем в 10 раз превышающей центральную частоту. Показана эффективность применения предложенной конструкции резонатора для создания миниатюрных фильтров по технологии LTCC.

Ключевые слова: полосно-пропускающий фильтр, резонатор на подвешенной подложке, двухслойная подложка, широкая полоса заграждения.

THE BAND-PASS FILTER WITH THE ULTRA-WIDE STOPBAND AND INTERFERENCE REJECTION LEVEL MORE THAN 100 DB

Ya. F. Balva¹, A. M. Serzhantov², S. A. Khodenkov¹, V. V. Ivanin¹, V. A. Shokirov¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: ya.f.balva@mail.ru

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

The authors propose miniature constructions of the stripline resonator performed on a double-layer suspended substrate and bandpass filters on its base. The filters have a wide stopband with high attenuation. The experimental bandpass filter of the fourth order with percentage bandwidth 5 % has the stopband on the level of –100 dB up to the frequency that 10 times exceeds the passband center frequency. It is shown that the miniature filters based on the proposed resonator could be effectively produced by LTCC technology.

Keywords: bandpass filter, miniature filter, suspended stripline resonator, double-layer substrate, wide stopband

Как известно, полосно-пропускающие фильтры (ППФ) являются важнейшими элементами современных радиотехнических систем связи, радиолокации и радионавигации. Одними из основных требований, предъявляемых к таким устройствам, являются миниатюрность и высокие селективные свойства, которые в том числе определяются наличием у ППФ широкой полосы заграждения (ПЗ) с большим уровнем затухания.

Распространенным способом расширения полосы заграждения является использование резонаторов со скачком волнового сопротивления, в которых частота основной моды колебаний может быть многократно ниже частоты следующей моды. Ширина ПЗ в таких фильтрах растет с увеличением скачка волнового сопротивления [1; 2]. Однако этот рост сопровождается существенным падением собственной добротности

резонаторов, обусловленным увеличением омических потерь на узком участке полоскового проводника. Для подавления ближайших паразитных полос пропускания ППФ на планарных резонаторах могут использоваться резонаторы со скачком волнового сопротивления с несовпадающими частотами высших мод колебаний [3]. Часто для подавления одной из паразитных полос предлагается использовать нули прохождения мощности, возникающие при кондуктивной связи концевых резонаторов с портами фильтра [4–6].

Расширить полосу заграждения также позволяет исключение взаимодействия смежных пар резонаторов на частотах высших мод колебаний [5; 6]. Это происходит в результате взаимной компенсации индуктивного и емкостного взаимодействий, например при определенной длине области связи резонаторов [7–9].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.A18.21.1857.

Несмотря на определенный прогресс в создании фильтров с широкой полосой заграждения высокочастотный край ПЗ по уровню -60 дБ во всех рассмотренных работах располагается не выше $8f_0$, где f_0 – центральная частота фильтра. Одним из путей расширения ПЗ является создание новых конструкций резонаторов, частота второй моды колебаний в которых многократно превышает частоту первой. Например, в случае коаксиального фильтра четвертого порядка [10] использование конструкции резонатора нового типа позволило повысить верхнюю границу ПЗ по уровню -90 дБ до $47 f_0$ [11]. Однако с точки зрения технологичности, надежности и стоимости такие устройства существенно уступают конструкциям на полосковых и микрополосковых структурах.

В настоящей работе предлагается миниатюрная конструкция полоскового резонатора, позволяющая создавать полосковые ППФ с рекордно глубокой и широкой полосой заграждения.

Резонатор (рис. 1) представляет собой двухслойную подвешенную подложку, на которой три полосковых проводника расположены один под другим. Два наружных проводника замкнуты одним концом на одну из боковых стенок корпуса. Внутренний проводник замкнут одним концом на противоположную боковую стенку. Другие концы полосковых проводников свободны и не достают до боковых стенок.

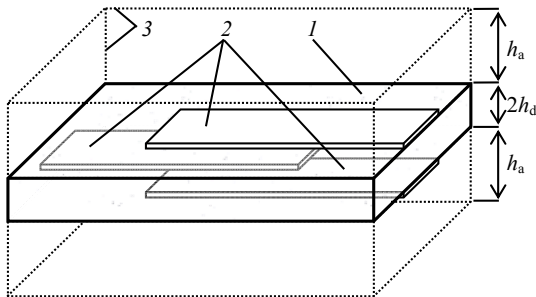


Рис. 1. Конструкция полоскового резонатора

Для первой (рабочей) моды колебаний, имеющей самую низкую частоту f_1 , токи на всех трех проводниках текут в одну сторону (рис. 2, а). Для второй моды, имеющей более высокую частоту f_2 , токи на верхнем и нижнем проводнике текут в противоположные стороны, а ток на внутреннем проводнике отсутствует (рис. 2, б). Для третьей моды, частота которой $f_3 > f_2$, токи на верхнем и нижнем проводнике текут в одном

направлении, а ток на внутреннем проводнике течет в противоположном направлении (рис. 2, в). Важно, что в конструкциях фильтров на основе рассматриваемого резонатора, возбуждения второй моды колебаний можно избежать, если порты фильтра кондуктивно подключить к внутреннему проводнику резонатора. Вследствие этого протяженность ПЗ фильтра будет определяться соотношением частот f_1 и f_3 .

Проведенные исследования показали, что параметром, в наибольшей степени влияющим на частоту основной моды f_1 и отношение f_3/f_1 , является толщина диэлектрических слоев h_d .

Эти зависимости были получены электромагнитным 3D-моделированием с использованием программы *Ansoft HFSS*. При расчете использовались следующие параметры: длина резонатора $l_r = 20$ мм, длина полосковых проводников $l_s = 0.98l_r$, ширина проводников $w = 3$ мм, высота воздушных зазоров $h_a = 3.5$ мм, диэлектрическая проницаемость слоев $\epsilon_r = 2.2$.

Из рис. 3, а видно, что частота f_1 понижается с уменьшением толщины h_d , а отношение f_3/f_1 , характеризующее ширину полосы заграждения фильтра, растет. Отметим, что при этом будет одновременно уменьшаться длина резонатора, и увеличиваться его собственная добротность за счет снижения омических потерь. На рис. 3, б построены зависимости собственной добротности резонатора Q_1 для первой моды от толщины h_d . Расчет выполнен для двух значений тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$. Проводимость проводников была $\sigma = 5.6 \times 10^7$ См/м (соответствует меди). Частота резонатора поддерживалась постоянной ($f_1 = 1$ ГГц) за счет соответствующего укорочения его длины l_r . Значения остальных параметров были теми же, что и при расчете графиков на рис. 3, а.

Как показали исследования, для увеличения ширины полосы заграждения также следует увеличивать ширину полосковых проводников w и увеличивать толщину воздушного зазора между диэлектрической подложкой и стенками металлического корпуса h_a . Однако это приводит к увеличению размеров фильтра. Увеличение диэлектрической проницаемости подложки несущественно увеличивает ширину полосы заграждения.

Перспективность применения предложенного резонатора в технике СВЧ подтверждается приводимыми ниже результатами электромагнитного 3D-моделирования четырехрезонаторного фильтра (рис. 4), а также результатами измерений опытного образца.

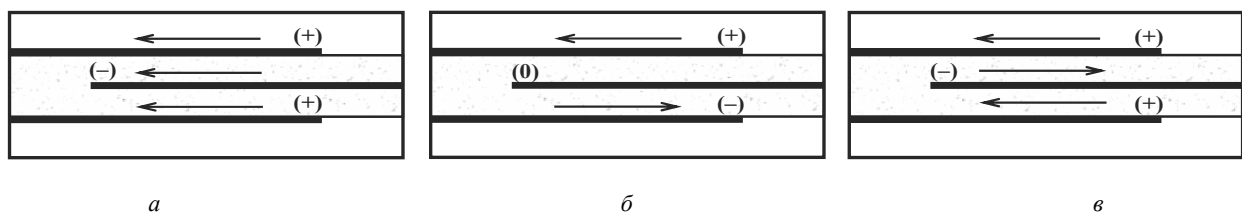


Рис. 2. Распределение токов в полосковых проводниках резонатора для первых трех мод колебаний

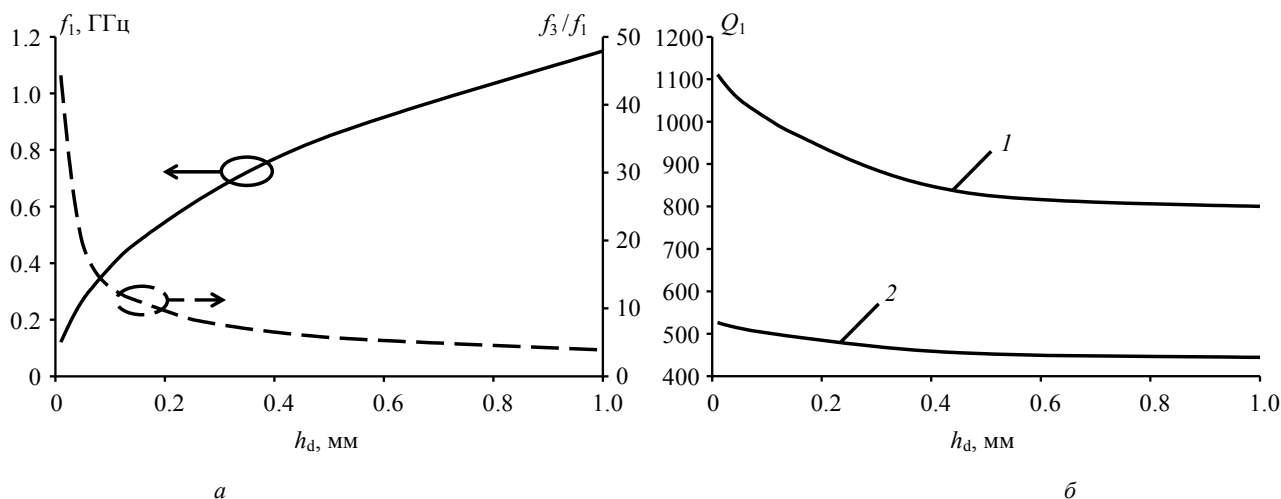


Рис. 3. Зависимости частоты первой моды резонатора f_1 и отношения f_3/f_1 от h_d (а); зависимости собственной добротности резонатора на частоте f_1 от h_d : 1 – при $\tan \delta = 0$; 2 – при $\tan \delta = 0.001$ (б)

В конструкции, приведенной на рис. 4, порты фильтра кондуктивно подключены к внутренним полосковым проводникам наружных резонаторов. Расчет показал, что изменяя только толщину диэлектрических слоев при прочих равных условиях (в данном случае при $\epsilon_r = 2.2$, $h_a = 3.5$ мм, $w = 3$ мм, $l_s = 0.98l_r$, зазор между внутренними резонаторами $S_1 = 6.5$ мм и зазоре между внутренними и наружными резонаторами $S_2 = 5.75$ мм), можно существенно расширить полосу заграждения фильтра.

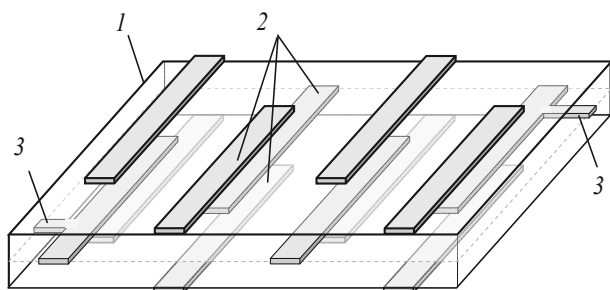


Рис. 4. Конструкция четырехрезонаторного фильтра (без корпуса-экрана):

1 – двухслойная подвешенная диэлектрическая подложка;
2 – полосковые проводники; 3 – порты фильтра

На рис. 5 приведены АЧХ фильтров, рассчитанные для трех значений h_d : 0.5 мм (кривая 1), 0.25 мм (кривая 2) и 0.125 мм (кривая 3). Относительная ширина полосы пропускания всех трех фильтров 5 %, центральная частота $f_0 = 1$ ГГц для каждой толщины подстраивалась длиной резонаторов l_r . Из рисунка видно, что с уменьшением толщины диэлектрических слоев ширина полосы заграждения существенно увеличивается.

Для эксперимента двухслойная подложка макета фильтра была выполнена из материала RT/Duroid толщиной $h_d = 0.2$ мм, имеющего диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 3.4$ и диэлектрические потери

$\tan \delta \approx 0.002$. Подложка имеет размеры 12×38 мм². Все полосковые проводники резонаторов имеют ширину $w = 3$ мм. Длина проводников внутренних резонаторов равна $l_s = 9$ мм, а длина проводников наружных резонаторов – $l_s = 9.25$ мм. Толщина воздушных зазоров между диэлектрической подложкой и стенками металлического корпуса равна $h_a = 3.5$ мм. Зазор между соседними внутренними резонаторами составлял $S_1 = 6.5$ мм, а между внутренним и наружным резонатором – $S_2 = 5.75$ мм.

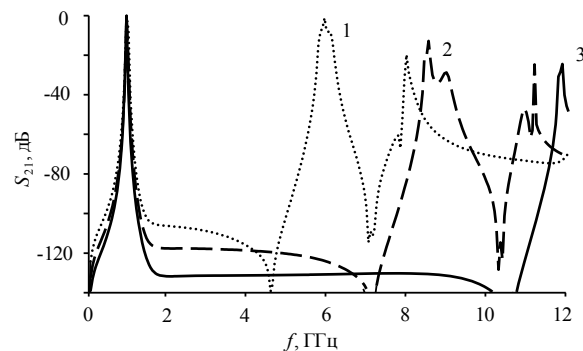


Рис. 5. АЧХ фильтров при разных значениях толщины диэлектрических слоев:

1 – $h_d = 0.5$ мм, 2 – $h_d = 0.25$ мм, 3 – $h_d = 0.125$ мм

Измеренная амплитудно-частотная характеристика изготовленного макета представлена на рис. 6, здесь же приведена фотография устройства.

Фильтр имеет центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 1$ ГГц при относительной ширине полосы пропускания $\Delta f/f_0 \approx 5$ %. Минимальные потери СВЧ мощности в полосе пропускания составляют около 3 дБ. Верхняя граница полосы заграждения по уровню -100 дБ простирается до $10.5f_0$.

Наиболее эффективно предложенная конструкция полосно-пропускающего фильтра может быть реали-

зована с помощью технологии многослойных интегральных схем на основе керамики с низкой температурой отжига (*Low Temperature Cofired Ceramics – LTCC*). На рис. 7 приведена расчетная АЧХ четырехрезонаторного монолитного фильтра, выполненного на основе материалов, применяемых в *LTCC* технологии. Конструктивные параметры фильтра были следующими.

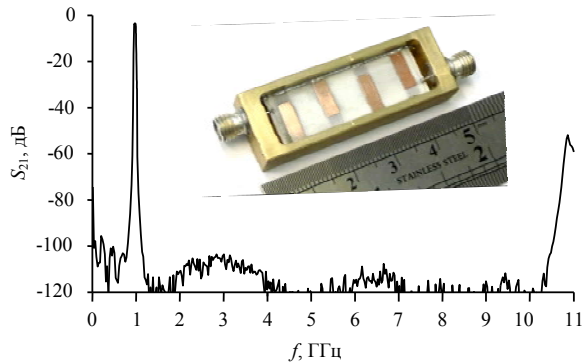


Рис. 6. Измеренная АЧХ макета четырехрезонаторного фильтра

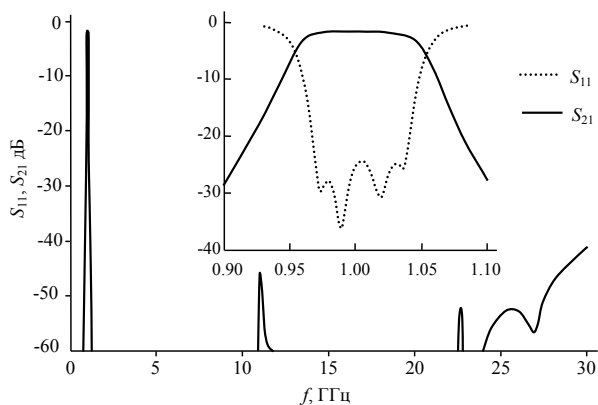


Рис. 7. Расчетная АЧХ четырехрезонаторного *LTCC* фильтра

Материал диэлектрических слоев (керамических листов), заполняющих весь объем фильтра – *Heratope CT2000* ($\epsilon = 9.1$, $\text{tg}\delta = 0.002$) толщиной 20 мкм (между полосковыми проводниками) и 600 мкм (3 листа по 200 мкм между проводниками и экранами) [1]. Ширина полосковых проводников 1 мм, их длина 3.5 мм, полная длина резонаторов 4.5 мм. Материал проводников – вожженная проводящая паста *HF612* на основе *Ag* толщиной 10 мкм с удельным поверхностным сопротивлением 2 мОм/Г [1]. Расстояние между парой внутренних резонаторов 1 мм, между парами наружных 0.875 мм. Для оптимальной настройки фильтра в полосе пропускания центральные проводники внутренних резонаторов были укорочены на 0.1 мм.

Разработанный фильтр имеет центральную частоту полосы пропускания $f_0 = 1$ ГГц при относительной ширине полосы пропускания 10 %. Минимальное затухание в полосе пропускания фильтра составило

1.7 дБ. Полоса заграждения по уровню -70 дБ составила $\sim 11f_0$, а по уровню -40 дБ составила $\sim 30f_0$. Габариты фильтра $1.24 \times 4.25 \times 5$ мм³.

Таким образом, в работе предложена и исследована миниатюрная конструкция оригинального полоскового резонатора на двухслойной подвешенной подложке, позволяющая создавать планарные микроволновые полосно-пропускающие фильтры с рекордно широкой и глубокой полосой заграждения. Показана возможность реализации устройств на таких резонаторах в монолитном исполнении с использованием *LTCC* технологии.

Библиографические ссылки

1. Chen Y.-M., Chang S.-F., Chang C.-C., Hung T.-J. Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. Vol. 55. № 10. 2007. P. 2191–2199.
2. Селективные свойства микрополосковых фильтров на четвертьволновых сонаправленных шпильковых резонаторах / Б. А. Беляев, С. В. Бутаков, Н. В. Лалетин и др. // *Радиотехника и электроника*. 2006. Т. 51, № 1. С. 24–36.
3. Lin S.-C., Deng P.-H., Lin Y.-S., Wang C.-H., Chen C. H. Wide-stopband microstrip bandpass filters using dissimilar quarter-wavelength stepped-impedance resonators // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 2006. Vol. 54. № 3. P. 1011–1017.
4. Kuo J.-T., Shih E. Microstrip stepped impedance resonator bandpass filter with an extended optimal rejection bandwidth // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 2003. V. 51. № 5. P. 1554–1559.
5. Kuo T.-N., Li W.-C., Wang C.-H., Chen C. H. Wide-stopband microstrip bandpass filters using quarter-wavelength stepped-impedance resonators and bandstop embedded resonators // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2008. Vol. 18. № 6. P. 389–391.
6. Chen Y.-M., Chang S.-F., Chang C.-C., Hung T.-J. Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range // *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*. 2007. Vol. 55. № 10. P. 2191–2199.
7. Kuo J.-T., Chen S.-P., Jiang M. Parallel-coupled microstrip filters with over-coupled end stages for suppression of spurious responses // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. V. 13. № 10. 2003. P. 440–442.
8. Sanchez-Soriano M. Á., Torregrosa-Penalva G., Bronchalo E. Multispurious suppression in parallel-coupled line filters by means of coupling control // *IET Microw. Antennas Propag.* 2012. Vol. 6. № 11. P. 1269–1276.
9. Особенности коэффициентов связи регулярных микрополосковых резонаторов / Б. А. Беляев, Н. В. Лалетин, А. А. Лексиков, А. М. Сержантов // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48, № 1. С. 39–46.
10. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Tyurnev V. V., Leksikov A. A. Miniature bandpass filter with a wide stopband up to $40f_0$ // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2012. Vol. 54, № 5. P. 1117–1118.

11. Миниатюрный коаксиальный резонатор и полотно-пропускающий фильтр на его основе со сверхширокой полосой заграждения / Б. А. Беляев, А. М. Сержантов, В. В. Тюрнев, А. А. Лексиков, Ан. А. Лексиков // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 1. С. 95–102.

References

1. Chen Y.-M., Chang S.-F., Chang C.-C., and Hung T.-J. *Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 55, 2007, p. 2191–2199.
2. Belyaev B. A., Butakov S. V., Laletin N. L., Leksikov A. A., Tyurnev V. V. and Chesnokov O. N. *Selective properties of microstrip filters designed on quarter-wave codirectional hairpin resonators*. Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 51, 2006, N. 1, pp. 20–30.
3. Lin S.-C., Deng P.-H., Lin Y.-S., Wang C.-H., Chen C.H. *Wide-stopband microstrip bandpass filters using dissimilar quarter-wavelength stepped-impedance resonators*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, 2006, p. 1011–1017.
4. Kuo J.-T., Shih E. *Microstrip stepped impedance resonator bandpass filter with an extended optimal rejection bandwidth*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 51, 2003, p. 1554–1559.
5. Kuo T.-N., Li W.-C., Wang C.-H., Chen C.H. *Wide-stopband microstrip bandpass filters using quarter-wavelength stepped-impedance resonators and bandstop embedded resonators*. IEEE Microwave Wireless Components Letters, Vol. 18, 2008, No. 6, p. 389–391.
6. Chen Y.-M., Chang S.-F., Chang C.-C., Hung T.-J. *Design of stepped-impedance combline bandpass filters with symmetric insertion-loss response and wide stopband range*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 55, 2007, p. 2191–2199.
7. Kuo J.-T., Chen S.-P., Jiang M. *Parallel-coupled microstrip filters with over-coupled end stages for suppression of spurious responses*. IEEE Microwave Wireless Components Letters, Vol. 13, 2003, No. 10, p. 440–442.
8. Sánchez-Soriano M.Á., Torregrosa-Penalva G., Bronchalo E. *Multispurious suppression in parallel-coupled line filters by means of coupling control*, IET Microwaves Antennas & Propagation, Vol. 6, 2012, p. 1269–1276.
9. Belyaev B. A., Laletin N. V., Leksikov A. A., and Serzhantov A. M. *Peculiarities of coupling coefficients of a regular microstrip resonator*. Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 48, 2003, No. 1, p. 31–38.
10. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Tyurnev V. V., Leksikov A. A. *Miniature bandpass filter with a wide stopband up to $40f_0$* . Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 54, 2012, p. 1117–1118.
11. Belyaev B. A., Serzhantov A. M., Tyurnev V. V., Leksikov A. A., and Leksikov An. A. *Miniature coaxial resonator and related bandpass filter with ultra-wide stopband*, Technical Physics Letters, Vol. 38, 2012, No. 1, p. 47–50.

© Бальва Я. Ф., Сержантов А. М., Ходенков С. А., Иванин В. В., Шокиров В. А., 2013

УДК 62-503.57

А. Ю. Власов¹, Н. В. Филенкова², Д. Е. Кравчук²

РАЗРАБОТКА ПРЕЦИЗИОННЫХ АНТЕННЫХ РЕФЛЕКТОРОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ: СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ*

¹ООО «СИБИНВЕНТ-КОСМОС» (МИП СибГАУ)

Россия, 660059, Красноярск, ул. Семафорная, 433, корп. 1, ЛЗ-37

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: vlasov.anton@gmail.com

Рассматривается способ адаптивного управления технологическим процессом создания прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов заключающийся в том, что последовательно на каждом технологическом этапе измеряются контролируемые и технологические параметры, уточняются экспериментальные зависимости определяющие связь контролируемых параметров с показателями качества готового изделия. На основе полученных данных оптимизируются технологические параметры последующих этапов, обеспечивающие достижения заданных показателей качества готового изделия.

Ключевые слова: адаптивная система управления, технологический процесс, рефлектор, композиционный материал.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.513.11.0014 от 11 марта 2013 г.

DEVELOPMENT OF THE PRECISION SATELLITE REFLECTORS OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS: ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF MANUFACTURING PROCESS

A. Yu. Vlasov¹, N. V. Filenkova², D. E. Kravchuk²

¹«SibINVENT-KOSMOS», Ltd
433/1 Semaforaya str., Krasnoyarsk, 660059, Russia

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: vlasov.anton@gmail.com

The way of the adaptive management process of development of the high-precision antenna reflectors, made of polymer composites, is considered. The process proceeds in a successive order, at the each process step the process parameters are measured and controlled, experimental curves defining the relationship of monitored parameters with quality of the finished product, are refined. On the basis of the obtained data the process parameters of the following stages, providing for the finished product quality target value, are optimized.

Keywords: adaptive control system, manufacturing process, parabolic reflector, composite material.

Процесс производства изделий сложной формы из полимерных композиционных материалов (ПКМ) достаточно трудоемок, в ходе производства требуется контролировать множество параметров, образующих между собой нелинейные зависимости, причем от характера эволюции процесса в прошлом зависят его статистические характеристики в будущем. Таким образом, технологическому процессу производства изделий из ПКМ присущи все признаки немарковского процесса. В конечном счете, определенное сочетание технологических параметров определяет эксплуатационные качества изделия. Обеспечить соответствие эксплуатационных качеств готового изделия заданным призвана адаптивная система управления технологическим процессом. При выходе значений хотя бы одного параметра за пределы допустимого диапазона, изделие не будет иметь требуемых от него свойств и будет отбраковано, что приведет к временным и материальным потерям.

Построение интегрированной автоматизированной системы управления позволит на более высоком уровне решать задачи автоматизации производства изделий из ПКМ. Такая система способна не только поддерживать рассчитанные ранее параметры режима получения изделий, но и следить за ходом процесса, корректировать технологический режим при разбросе свойств исходных материалов и изменении требований к изделию, реагировать на возникновение нестандартных ситуаций [1].

В настоящей работе обозначенная проблема решается путем измерения на каждом этапе технологического процесса контролируемых параметров, характерных для данного этапа, определения по известным экспериментальным зависимостям качества готового изделия от этих параметров путем оптимизационных вычислений значения возможных показателей качества изделия, сравнивают их с заданными и производят корректировку технологических параметров последующего этапа.

Таким образом, ориентируясь на один из ключевых показателей качества готового изделия – СКО

(среднеквадратичное отклонение) определяются коэффициенты функции показывающей вероятность достижения желаемого СКО образца в зависимости от числа слоев [2]. После получения зависимостей для функций определяющих вероятность достижения желаемого СКО от относительной вязкости и числа слоев строим обобщенную зависимость в мультипликативной форме

$$R(\eta_{rel}, n) = \left(1 - \frac{\eta_{rel}^m}{A + \eta_{rel}^m}\right) \cdot \left(1 - \frac{B}{B + \eta_{rel}}\right) \times \\ \times \left(1 - \frac{t_1}{t_2 + n^3}\right) \cdot \left(1 - \frac{n^2}{D + n^2}\right),$$

где η_{rel} – относительная вязкость, как отношение текущего значения вязкости к предельно возможному для данного вида связующего, n – количество слоев материала характеризующего пропускную способность связующего. Поверхности функции $R(\eta_{rel}, n)$ показаны на рис. 1.

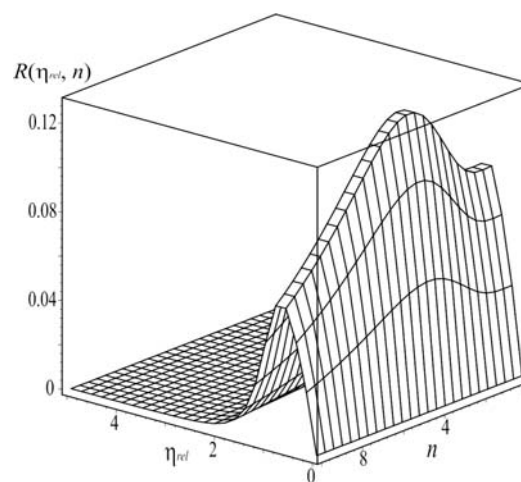


Рис. 1. Вероятность достижения целевого показателя качества изделия из ПКМ от контролируемых параметров вязкости и числа слоев

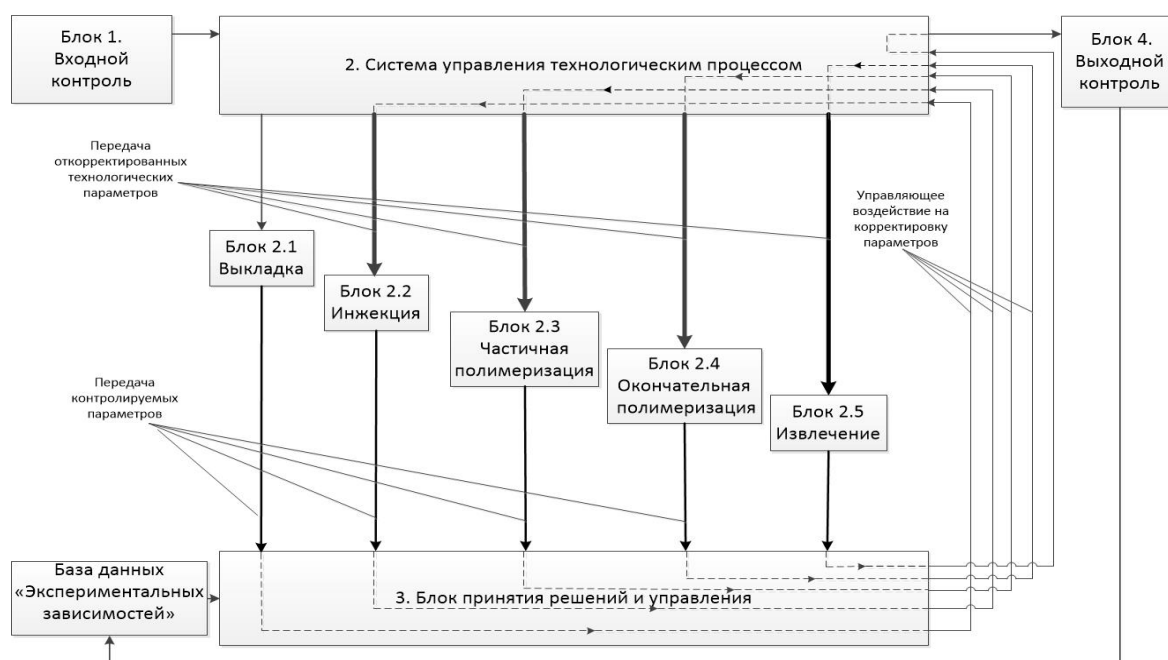


Рис. 2. Принципиальная схема адаптивной системы управления технологическим процессом

Логарифмируя $R(\eta_{rel}, n)$, получаем зависимость $W(\eta_{rel}, n) = \ln(R(\eta_{rel}, n))$ и находим абсолютный максимум этой функции для каждого вида связующего, дифференцируя функцию по параметрам η_{rel} и n и численно решая систему полученных двух уравнений. Таким образом, определяем оптимальные значения для числа слоев и относительной вязкости, используя экспериментальные зависимости и вычисленные по ним значения константы A, B, D, t_1 и t_2 , которые в свою очередь связаны и параметрами технологического процесса, такими как давление, температура, влажность необходимые для обеспечения оптимального выполнения последующего этапа технологического процесса.

Таким образом, при адаптивном управлении технологическим процессом изготовления антенного рефлектора, осуществляется оптимальный подбор параметров конкретного технологического этапа, что определяет заданное конечное качество изделия. На рис. 2 приведена схема системы адаптивного управления.

Особенностью данной системы управления является последовательная корректировка технологических параметров этапов изготовления изделия. Так получив информацию о контролируемых параметрах первого этапа при определенных технологических параметрах блок принятия решения, основываясь на описанном выше способе оптимизации, выдает управляющее воздействие на корректировку технологических параметров последующего этапа. Таким правилам поведения подчинены все этапы технологического процесса. По завершению технологического процесса полученный опыт в виде уточненных параметров дополняет экспериментальную базу данных зависимостей показателей качества от контролируемых

параметров, которая в свою очередь выдает начальные данные новому изготавливаемому экземпляру. Таким образом, система имеет возможность адаптироваться не только в рамках этапа, но и в рамках технологических процессов при серийном выпуске продукции.

В работе рассмотрен подход к построению системы адаптивного управления технологическим процессом изготовления прецизионных изделий из ПКМ. Данный подход основан на использовании экспертных зависимостей показателей качества от параметров составных частей изделия в качестве базовых элементов, относительно которых строится оптимизация технологических параметров.

Библиографические ссылки

1. Семенова Е. Г. Основы моделирования и диагностики антенных устройств бортовых комплексов. СПб.: Политехника, 2003. 186 с.
2. Суховольский, В. Г. Экономика живого: Оптимизационный подход к описанию процессов в экологических сообществах и системах. Новосибирск: Наука, 2004. 140 с.

References

1. Semenova E. G. *Osnovy modelirovaniya i diagnostiki antennykh ustroystv bortovykh kompleksov* (Fundamentals of modeling and diagnostics of antenna devices airborne systems). SPb., Politekhnik, 2003, 186 p.
2. Soukhovolsky V. G. *Ekonomika zhivogo: Optimizatsionnyy podkhod k opisaniyu protsessov v ekologicheskikh soobshchestvakh i sistemakh* (The living economy: An optimization approach to the description of processes in ecological communities and systems). Novosibirsk, Nauka, 2004, 140 p.

УДК 621.791.72

К РАЗРАБОТКЕ КОНЦЕПЦИИ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ТЕРМОУПРУГИМИ ЯВЛЕНИЯМИ*

Н. Д. Гайденок, Н. Ю. Серегин, Д. П. Савенков, А. В. Майтакова

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

Рассмотрена концепция снижения остаточных напряжений в сварных соединениях при электронно-лучевой сварке (далее ЭЛС), обусловленных явлениями термоупругости и термопластичности металлов. На основе анализа механических и термофизических особенностей динамики процесса ЭЛС показано, что причиной коробления поверхности изделия являются термоупругие волны, определяющие главный феномен явления – продольно-поперечный изгиб изделия после процесса сварки за счет остаточных сварочных напряжений. Приводятся основные модели процесса, а также строится модель явления учитывающая структурные изменения свариваемого материала – накопление и релаксацию деформаций во время структурных переходов. Попытка подобного учета истории нагружения для материала, испытывающего фазовый переход, и данного вида сварки проводится впервые. Задача имеет также прикладное значение, т.к. себестоимость такой сварки довольно высокая, и снижение процента брака повышает рентабельность производства.

Ключевые слова: Сварные соединения, электронно-лучевая сварка, остаточные напряжения, история нагружения, физика прочности, технология сварки.

TO THE CONCEPTION OF REDUCING THE RESIDUAL STRESSES AT THE ELECTRON BEAM WELDING IN WELDED JOINTS CAUSED BY THERMOELASTIC PHENOMENA

N. D. Gaidenok, N. Yu. Seregin, D. P. Savenkov, A. V. Maytakova

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

The article deals with the concept of reducing the residual stresses resulting from the phenomena of thermoelastic and thermoplastic metals in welded joints at the electron beam welding (further EBW). On the basis of the analysis of mechanical and thermophysical characteristics of the dynamics of electron-beam welding (EBW) process it is shown that the cause of distortion of the products surfaces is in thermoelastic surface waves that determine the main phenomenon, precisely the longitudinal – transverse bending of the product after the welding process due to the residual welding stresses. The basic model of the process is presented and the model of the phenomenon, that takes into account the structural changes in the accumulation of material to be welded and the relaxation of strain in structural transitions, is developed. The attempt of taking into account the loading history of the material that undergoes a phase transition in this type of welding is made the first time. The problem has also the applied meaning because the cost of such welding is high and reduction of the defect rate can significantly increase the profitability of production.

Keywords: Welds, electron beam welding, residual stresses, loading history, physics strength, welding technology.

Введение и постановка проблемы. При электронно-лучевой сварке (далее ЭЛС) изделий (рис. 1) одним из дефектов шва является непровар, для устранения которого в работе [1] предлагается, по сути дела, техническая реализация основного метода теории надежности – ее повышение за счет изменения плотности распределения энергии по пятну нагрева, осуществляемого за счет многократного сканирования луча по пятну прогрева.

Типовая технология ЭЛС, осуществляемая без сканирования, приводит к дополнительному расходу энергии и увеличению времени обработки, и короблению поверхности изделия (рис. 2), выражающимся в наличии волн различного периода и амплитуды, зави-

сящих, как показали натурные наблюдения, от термо-механических параметров и геометрии процесса сварки.

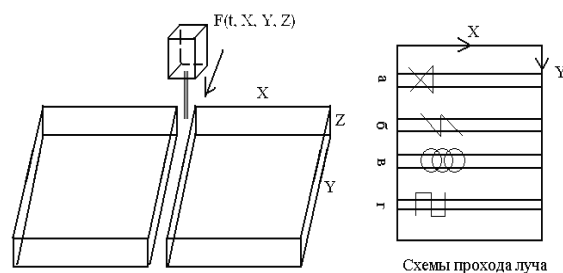


Рис. 1. Схема процесса сварки

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 7.4765.2011.

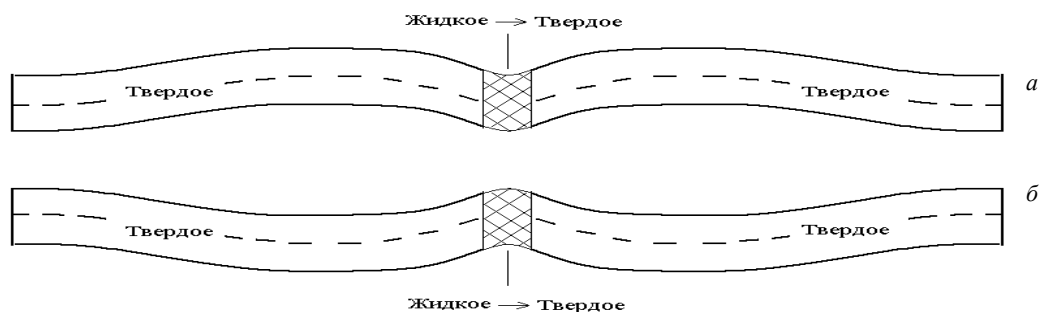


Рис. 2. Схема коробления

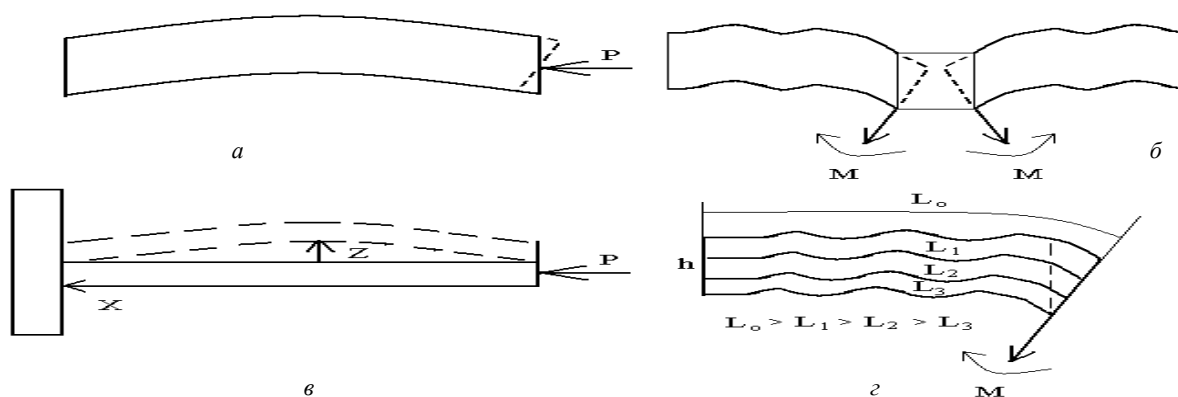


Рис. 3. Схема базовых термо-механических процессов

С механических позиций используются преимущественно два вида закрепления заготовок (пластин) при ЭЛС – с фиксированными (зашемленными) кромками и со свободными кромками.

В качестве одного из вариантов технологии процесса ЭЛС первого типа можно привести пример сварки оболочек больших размеров, который в силу угловой симметрии сопроводим иллюстрациями сечений вдоль продольной оси в диаметральной плоскости (рис. 2).

Итак, имеем следующее.

1. Каждая из частей изделия помещается одним из торцов в фиксатор.
2. Изделия сближаются на расстояние порядка 1–2 мм и жестко фиксируются по оси X.
3. Происходит движение луча по длине шва (ось Y) в соответствии с одной из схем (рис. 1, б).
4. После расплавления материала изделия происходит сварка частей изделия.

Однако, после остывания изделия на его поверхности, как уже сказано выше, появляется волнистость сварочного шва (рис. 2) вне всяких сомнений зависящих от термических параметров процесса ЭЛС и геометрии изделия.

Несмотря на то, что происходит изменение геометрии изделия по типу показанного на рис. 2, а, здесь согласно работе [2], возможен также и второй тип изменение геометрии изделия (рис. 2, б).

Метод решения. Наиболее адекватным объяснением процесса могут послужить феномены расширения материала при нагревании и последующего накопления деформаций в зонах термического разупрочнения находящимся вблизи сварочного канала, и динамически перемещающимися вместе с ним. Однако скорости процессов релаксации и перехода металла в упруго-пластичное состояние не совпадают, что и приводит к описываемым явлениям (рис. 1).

Явление коробления сваренных пластин обусловлено, как высокой интенсивностью передачи тепла электронного луча свариваемому материалу, так и достаточно высокой скоростью сварки. Что приводит к большим градиентам температуры, либо между верхней и нижней поверхностями изделия (ось Z, рис. 3), либо между внешней и внутренней проводящий к выгибанию изделия, как правило, наружу (рис. 2, а) [2]. При этом размер сварочной ванны и зоны термического влияния (далее ЗТВ), довольно небольшой (по сравнению с другими видами сварки), но значения скоростей нагрева материала в зоне может быть выше чем при других видах сварки.

Рассмотрим «пластичное ядро» («разупрочненное ядро»), виде зоны разупрочнения окружающую сварочную ванну, стесненную внешними нагретыми слоями. В случае жесткого закрепления концов пластин, это приводит к изменению схемы закрепления, так как появляется новая степень свободы. Что может

к преобразованию накопленной (в «холодных зонах») потенциальной энергии сил упругости, в работу по деформированию разупрочненного ядра. С точки зрения механики можно рассмотреть данный феномен, как потерю устойчивости системы.

В связи с этим в процессе исследования данной проблемы необходимо решить следующие задачи.

1. Расчет различных температурных полей в телах с несколькими агрегатными состояниями – от твердого до газообразного испарения металла – «Термопроцесс».

2. Расчет термоупругих деформаций на основании закономерностей для конкретных схем закрепления с учетом появления во время сварки зоны разупрочнения и изменения реологических модели деформирования материала в ЗТВ. Термопроцесс. Здесь в виду правильной геометрической формы изделия достаточно решать задачу Стефана (фазовые переходы под действием температуры) на регулярной сетке [3].

Классической задачей Стефана называют простейшую одномерную задачу промерзания (застывания), кристаллизации (плавления), когда теплофизические характеристики, начальные и граничные условия принимаются постоянными. Рассмотрим процесс застывания шва в виде параллелепипеда длиной L (рис. 4). Задача о распределении температуры при наличии фазового перехода и о скорости движения границы раздела фаз сводится к решению уравнений теплопроводности для жидкой (1) и твердой (2) фаз где $x = \xi(t)$ – граница раздела фаз:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1^2 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < \xi(t) \quad (1),$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2^2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \xi(t) < x < L. \quad (2)$$

С дополнительными условиями:

$$T_1 = C_1, x = 0, \quad (3),$$

$$T_2 = C, t = 0, \quad (4),$$

а на границе фазового перехода заданы условия:

$$T_1(\xi - 0, t) = T_2(\xi + 0, t) = T_\phi, \quad (5)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, a_1^2, a_2^2$ коэффициенты теплопроводности и температуропроводности твердого и расплавленного

металла, постоянны. Индексы «-», «+» обозначают значения соответствующих величин слева и справа от фронта фазового перехода. Не нарушая общности можно положить температура фронта (границы раздела сред) $T_\phi = 0$.

Существуют различные варианты решения данной задачи. Наиболее универсальным методом решения задач Стефана являются численные методы, которые начали разрабатываться с 50-х годов 20 века. В настоящее время известны четыре основных разностных метода: ловли фазового фронта в узел разностной сетки, выпрямления фронтов, сглаживания коэффициентов и схемы сквозного счета. Характерная особенность первых двух методов состоит в том, что в них разностные схемы строятся с явным выделением искомого фронта фазового перехода. Для двух последних методов используются разностные схемы сквозного счета. Помимо выше указанных на практике также используется метод, где коэффициенты температуропроводности представляются в виде немонотонной функции от температуры $k_*(T)$ (рис. 5) и дальше идет расчет по однородной схеме

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum k_i(T) \frac{\partial T}{\partial X_i} + F(t, X, Y, Z) + \text{теплоотдача}(\sim U(T^4)) \quad (6)$$

$$X_i = (X, Y, Z)$$

$$T(0, X, Y, Z) = T_0 - \text{начальные условия} \quad (7)$$

$$T(t, 0, Y, Z) = T_x(0) - \text{граничные условия} \quad (8)$$

.....

$$T(t, X, Y, L) = T_z(L) - \text{граничные условия}$$

В виду симметричности по оси X задачу (6) можно свести к двум измерениям (для поперечного изгиба), т. е. профильной задаче, дискретная схема которой показана на рис. 6.

Для исследования термонапряжений в случае продольного изгиба можно даже ограничиться и одномерной задачей

Механика. В общем случае деформация данного соединения, можно в первом приближении выразить через упругий изгиб пластины. Задачу будем решать в перемещениях.

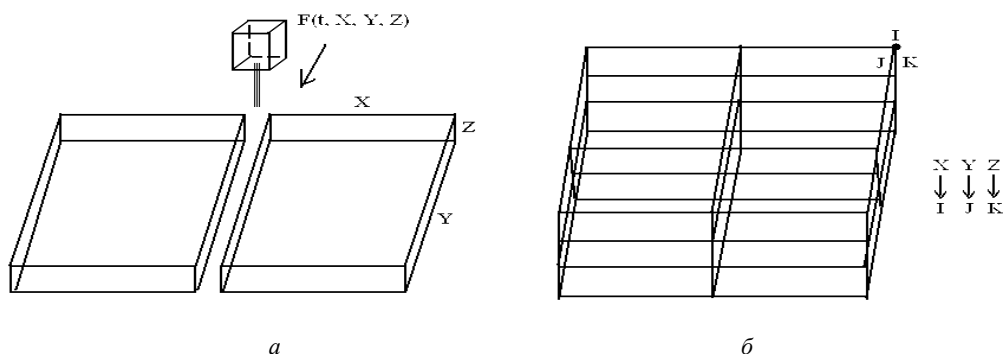


Рис. 4. «Термопроцесс»

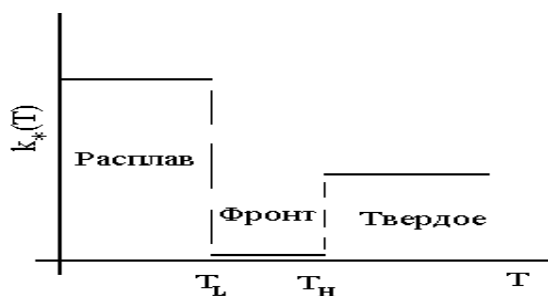


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры

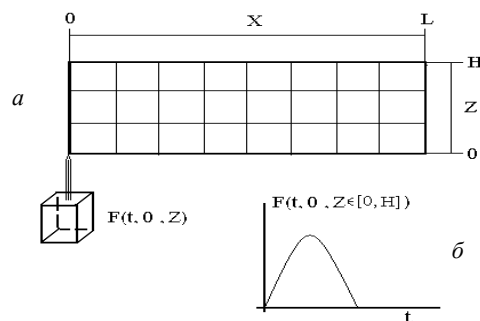


Рис. 6. Редукция к профильной задаче

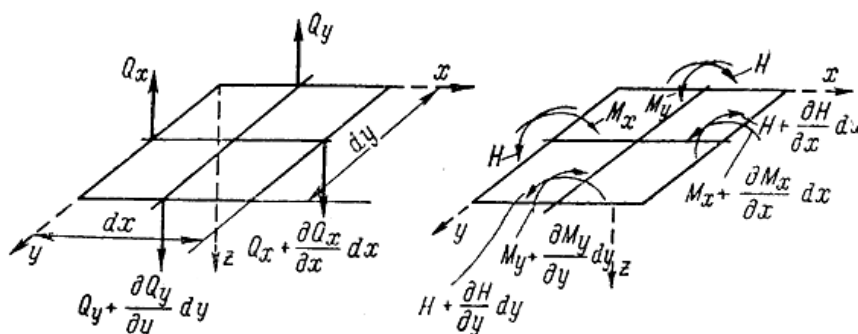


Рис. 7. Силовые факторы действующие на прямоугольный элемент пластины

Можно описывается уравнениями Кармана [4] – «дифференциальный формализм». Для поперечного изгиба пластины – $[0, L] \times [0, 1]$, сечение которой показано на рис. 4.а, они согласно [5] для переменных $f(x, y)$ – функция напряжений, которая связана с силовыми факторами следующими соотношениями:

$$N_x = h \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}; N_y = h \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}; T_{xy} = T_{yx} = -h \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}, \quad (9.1)$$

где N_x, N_y , – погонные (на единицу длины) нормальные усилия; T_x, T_y – погонные перерезывающие усилия; $q(x, y)$ – нагрузка и $w(x, y)$ – смещение вдоль координаты Z (прогиб пластины) (рис.7) имеют следующий вид:

$$\nabla^2 \nabla^2 f = E \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right], \quad (9.2.1)$$

$$\nabla^2 \nabla^2 w = \frac{1}{D} \left[q(x, y) + h \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \right], \quad (9.2.2)$$

где D – цилиндрическая жесткость пластины выражаемая как:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (9.3)$$

где E – модуль Юнга; h – толщина пластины; μ – коэффициент Пуассона

Запишем для уравнений (9.2) граничные условия

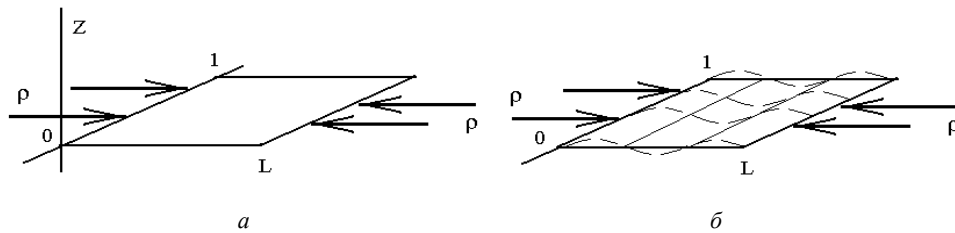
$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq L, y = 0, \quad M_y = 0, Q_y^0 = 0, \\ 0 \leq y \leq 1, x = 0, \quad w = 0, M_x = 0, \\ 0 \leq x \leq L, y = 1, \quad M_y = 0, Q_y^0 = 0, \\ 0 \leq y \leq 1, x = L, \quad w = 0, M_x = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где M_x, M_y – изгибающие моменты; Q_y^0 – перерезывающая сила; w – как мы уже говорили, прогиб срединной поверхности (см. рис. 7) означают тот факт, что пластинка закреплена на сторонах параллельных y оси шарнирно, а кромки параллельные оси x свободны.

Совместное решение уравнений (9) при начальных условиях (10) дают решение в виде (11) – рис. 8, б при этом надо учитывать что в данном случае мы считаем что пластина единичной ширины. Каждую такую пластину можно приближенно считать балкой (но при этом учитывать влияние соседних полосок (балок), на рис. 7. данные усилия обозначены как H) и использовать уравнения для балки приведенные в следующем разделе.

$$w(x, y) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \cdot \sin(m\pi y) \quad (11)$$

Однако, в первом приближении для понимания общей концепции физических (механических) особенностей достаточно рассмотреть положения, относящиеся к теории продольно – поперечного изгиба [7] – «интегральный формализм». И более того, в силу принципа суперпозиции можно провести независимое исследование выше указанных видов изгиба.

Рис. 8. Решение уравнений Кармана, функции смещения по z $w(x, y)$

Как уже было сказано выше, данные вопросы довольно детально изучены в рамках теории сопротивления материалов [7]. Поэтому приведем здесь только итоговые результаты.

Поперечный изгиб. Здесь результатом является «Сила Эйлера» P_3 , выражение которой для одномерного случая имеет вид

$$P_3 = \frac{\pi^2 EJ}{L^2}, \quad (12)$$

где E – модуль Юнга; J – момент инерции; L – длина пластины. Сила P_3 , возникающая в результате температурных деформаций пластины, в первом приближении, достаточном для практических потребностей, м. б. представлена в виде

$$P = E \cdot \Delta L = E(L_{\max} - L(T_0)), \quad (13)$$

где $L_{\max}$ – максимальная длина пластины, достигнутая в результате температурных деформаций при нагреве изделия до расплава металла и последующего остывания до исходной температуры.

При характеристике поперечного изгиба сделаем ссылку на рис. 3, где показаны основные особенности данного феномена, достаточные для применения классических уравнений данного вида изгиба [7].

Меры по снижению деформаций. Причиной деформаций, как показал выше проведенный анализ, является объем тепловых затрат – действительно, в пластине не подверженной термовоздействию не наблюдается никаких градиентов и, как следствие, никаких дополнительных напряжений. Причем, величина деформации, в первом приближении, пропорциональна объему тепловых затрат. Это обусловлено тем фактом, что металл в «разупрочненном ядре» испытывает значительные деформации со стороны внешних нагретых упругих слоев, не успевающие релаксироваться. Поэтому основной концепцией стратегии борьбы продольным изгибом, является либо уменьшение этих деформаций в абсолютных величинах, либо изменение технологии таким образом, чтобы остаточные деформации в разных частях изделия компенсировали друг друга.

Одним из критериев при горизонтальном градиенте температуры, является то, что напряжения не должны превосходить определенного предела (12).

Для уменьшения поперечного изгиба также справедливо аналогичное утверждение – напряжения, вызванные вертикальными градиентами температуры не должны превосходить определенного предела, определяемого аналогом соотношения (9).

В связи с этим весь комплекс технических мер, направленных на снижение деформаций изделия или,

иначе говоря, приведения градиентов температуры в определенные пределы, можно разделить на три класса:

1. Изменение состава и структуры технологического оборудования.
2. Изменение технологии ЭЛС.
3. Изменение параметров и геометрии деталей изделия.

Однако, как показывают многочисленные технические решения, оптимум достигается в виде комбинации выше предложенных мер.

В качестве примеров, соответствующих типам мер, можно указать следующие:

1. Внести структурные изменения в устройство установки ЭЛС, регулирующие жесткость крепления оболочек;

2. Вертикальный градиент температур может быть уменьшен изменением режима сканирования электронного луча

3. Возможен локальный прогрев обратной стороны шва дополнительным источником энергии (как заранее, так и непосредственно в процессе сварки)

С формальных позиций острота проблемы коробления готовых изделий, может быть в определенной степени понижена в результате решения классической экстремальной задачи, которая представима в следующем агрегированном виде:

$$Z = c_0 O + c_T T + c_I I \rightarrow \max \quad (14)$$

$$a_0 O + a_T T + a_I I < \Phi,$$

где O , T и I – объем, c_i и a_i – степень уменьшения деформации и затраты по применению выше указанных мер.

Решение данной экономической задачи при предложенном типе экстремума, характере ограничения и знаках коэффициентов заведомо имеет место. Но, однако, конкретную, не только инженерную, но и формальную трудность представляет генерация практического вида технических решений. Методом, применяемым в данном случае, является морфологический анализ, геометрической моделью которого для рассматриваемого случая служит 3-х мерный куб.

Объем генерируемых и, как следствие, анализируемых вариантов существенным образом уменьшается посредством организации процесса генерации – здесь необходимо произвести упорядочивание технических мер (измерений) по возрастанию размерности вариантов [8].

Эффективным методом, который, по сути дела, в настоящее время уже используется при решении данной задачи, является жадный алгоритм, имеющий

своим практическим воплощением ранжировку мер по величинам коэффициентов a_i и разработку данного измерения. Таким шагом является изменение только технологии ЭЛС (многопроходность, дискретность) при сохранении прочих условий процесса.

В работе исследован подход к разработке общей концепции устранения коробления пластины ЭЛС, вызванного механическими явлениями, причиной которых, в свою очередь является термический режим ЭЛС. Показано, что практически все (или в большинстве из них) коробление можно устранить путем сохранения вертикальных и горизонтальных градиентов температуры в заданных пределах, определяемых на основе условий, типа «Сила Эйлера» или его аналога для вертикального градиента. В общем случае, для этого необходима разработка автоматизированной системы управления ЭЛС. В которой, посредством решения уравнений термоупругости, представленных в дифференциальном (уравнения типа Кармана) или в интегральном виде, программным (в ряде случаев и аппаратным – путем прошивки ПЗУ) способом (ЛУС-ЧПУ) для различных типов изделий, производится выбор оптимального режима в виде динамики амплитуды термонагрева по траектории луча – задача оптимального управления распределенными системами.

Библиографические ссылки

1. Экспериментальные исследования по оптимизации технологии ЭЛС алюминиевых сплавов / Ю. Н. Серегин, В. Д. Лаптенко, Н. В. Успенский, В. П. Ниткин // Технологии и оборудование ЭЛС : материалы конф. 2011. С. 71–80.
2. Махненко В. И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. Киев : Наукова думка, 1976. 320 с.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1972. 740с.
4. Савельев И. В. Курс физики. М. : Наука, 1973. 420 с.
5. Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. М. : Наука, 1965. 480 с.
6. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения : пер. с англ. М. : Мир, 1980. 612 с.
7. Писаренко Г. С. Сопротивление материалов. Киев : Высш. школа, 1979. 696 с.
8. Половинкин А. П. Теория изобретательства. М. : Высш. школа, 1975. 340 с.

References

1. Seregin Y. N, Laptenok V. D, Uspenskiy N. V, Nitkin V. P. *Materialy konferencii "Tekhnologii i oborudovanie dlya E'LS"* (Materials Conf. "Technology and Equipment ELS"). 2011, p. 71–80.
2. Maxnenko V. I. *Raschetnye metody issledovaniya kinetiki svarochnykh napryazhenij i deformacij* (Calculation methods of studying the kinetics of welding stresses and strains). Kiev, Naukova dumka, 1976, 320 p.
3. Tixonov A. N, Samarskiy A. A. *Uraveneniya matematicheskoy fiziki* (The equations of mathematical physics). Moscow, Nauka, 1965, 480 p.
4. Savel'ev I. V. *Kurs fiziki* (Physics course). Moscow, Nauka, 1973, 420 p.
5. Timoshenko S. P. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials). Moscow, Nauka, 1965, 480 p.
6. Poston T., Stuart I. *Teoriya katastrof i eyo prilozheniya* (Catastrophe theory and its applications). Moscow, Mir, 1980, 612 p.
7. Pisarenko G. S. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials). Kiev, Vysshaya shkola, 1979, 696 p.
8. Polovinkin A. P. *Teoriya izobretatel'stva* (The theory of invention). Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 340 p.

© Гайденов Н. Д., Серегин Н. Ю., Савенков Д. П., Майтакова А. В., 2013

УДК 621.762

Ю. И. Гордеев¹, А. К. Абкарян¹, Г. М. Зеер¹, А. А. Лепешев²

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ЛЕГИРУЮЩИХ КЕРАМИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ НА СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ*

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: aaa@mail.sibsau.ru

Получены новые данные о влиянии добавок керамических наночастиц на свойства твердых сплавов WC-Co, WC-TiC-Co, TiC-Ni-Mo с использованием расчетных и экспериментальных методов. Конечные физико-механические и эксплуатационные свойства твердосплавных композитов модифицированных наночастицами находятся в прямой зависимости от параметров их микроструктуры, соотношения объемных долей и размеров карбидных и сверхтвердых частиц.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственный контракт № 14.513.11.0039 от 20.03.2013 г.

Наночастицы введенные в связку снижают толщину металлической прослойки и, как результат, обеспечивают увеличение прочности связки и композита в целом. Обнаружено стабильное снижение среднего размера карбидного зерна (благодаря блокирующему влиянию добавок на процессы рекристаллизации). Результаты испытаний показывают что модифицирование наночастицами обеспечивает повышение следующих основных свойств: эксплуатационная стойкость в 1,3–4 раза; износостойкость 1,6–2 раза; трещиностойкость 1,8–2 раза; прочность на изгиб на 25–50 %.

Ключевые слова: твердосплавные композиты, наночастицы, микроструктурные параметры, размер зерна, прочность, эксплуатационная стойкость.

EFFECT OF ALLOYING ADDITIVES OF THE CERAMIC NANOPARTICLES ON THE STRUCTURAL PARAMETERS AND PROPERTIES OF HARD ALLOYS

Yu. I. Gordeev¹, A. K. Abkaryan¹, G. M. Zeer¹, A. A. Lepeshev²

¹Siberian Federal University

79 Svobodny prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: aaa@sibsau.ru

New data about influence of ceramic nanoparticles additives on the hard metals WC-Co, WC-TiC-Co, TiC-Ni-Mo properties are obtained with the use of calculating and experimental methods. The final physical and mechanical properties of hard metals modified with nanoparticles depend on their microstructural parameters, proportion of volume ratios and size of carbide and ultrafine particles. Nanoparticles introduced into a binder decrease the thickness of the metal interlayer and therefore increase the strength of binder and composite as a whole. The reduction of the carbide grain average size was found out as well (owing to nanoparticles blocking influence on recrystallization). The test results display that the modification with nanoparticles enables to increase the main properties: service durability 1,3–4 times; wear resistance 1,6–2 times; fracture toughness 1,8–2 times; transverse rupture toughness at 25–50 %.

Keywords: hard metal composites, nano-particles, microstructural parameters, grain size, fracture toughness, service durability.

Проводимые в последнее время работы по созданию нового поколения твердых сплавов ориентированы, в значительной степени, на формирование заданной структуры материалов с субмикронными карбидными зёрнами (величина зёрна от 0.3 до 0.8 мкм) либо уменьшением размеров карбидной фазы до наноразмерного состояния [1–4]. Это обеспечивает повышение всего комплекса физико-механических и эксплуатационных характеристик твёрдого сплава. Однако, сохранение карбидной фазы в наноразмерном состоянии, предотвращение рекристаллизации является достаточно сложной технологической задачей.

По нашему мнению, представляется целесообразным использовать размерные эффекты от применения наноразмерных частиц в качестве модифицирующих добавок в твердосплавных композитах. Внедрение наночастиц в металлическую связку может способствовать снижению средней толщины прослойки между карбидными зёрнами, реализации известных в материаловедении эффектов дисперсного упрочнения на фрагментарном уровне. Одновременно, включения твёрдых наночастиц выступают в роли ингибиторов роста зёрна карбидной фазы [5; 6], препятствуют образованию смежных границ карбидных зёрен при гомогенизации. Такие структурные изменения являются положительным фактором (анализ накопленной информации о взаимосвязи структурных параметров твёрдого сплава с его физико-механическими характеристиками показывает, что наиболее важными яв-

ляются – размер зёрен карбидной фазы, их контактность, толщина прослойки связующего) [1; 4; 5]. Повышение физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик может быть обеспечено при небольшом количестве добавок наночастиц к матричному материалу, без усложнения традиционной технологии и увеличения стоимости твердосплавных композитов.

Цель работы – изучение закономерностей формирования структуры и определение функциональных связей между параметрами структуры и конечными свойствами твердосплавных композитов, модифицированных наночастицами керамики.

Методика и аппаратура исследований. Для получения твердосплавных композитов в работе использовались общепринятая стандартная технология изготовления. Отличия заключаются в особенностях подготовки порошковых смесей карбидов вольфрама, титана и кобальта, а также карбонитридов титана на никель-молибденовой связке (в том числе получения плакированных порошков карбида вольфрама с ингибирующими добавками наночастиц керамики).

Приготовленные смеси использовались для изготовления штабиков для проведения испытаний на изгиб (ISO/CD 3327), четырехгранных и пятигранных резовых пластин, твердосплавных оправок и волок для определения коэффициента стойкости, таблеток Ø10×10 мм. На образцах разработанных материалов измерялись следующие физико-механические харак-

теристики: в процессе спекания измерялась усадка на dilatометре DIL 402; на спеченных образцах – плотность гидростатическим методом по ISO 3369; твердость по Виккерсу и коэффициент трещиностойкости (K_{IC}) по методу Палмквиста на микротвердомере ТП-7Р-1 путем измерения длины трещины, распространяющейся от угла отпечатка пирамидки Виккерса (нагружение при испытании 100, 200, и 300 Н) по ISO/DIS 28079; твердость по Роквеллу HRA- на приборе ТК с твердосплавными мерами на двух – трех образцах от партии по ISO 3878; износостойкость, согласно стандарту ASTM B611-85; пористость и содержание графита по ISO 4505; коэрцитивная сила на приборе «Кобальт» в соответствии с ISO 3326. Анализ микроструктуры образцов твердосплавных композиций проводился на растровом электронном микроскопе HITACHI TM 1000 и растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F с энергодисперсионным и волновым спектрометрами. Эксплуатационные и стойкостные испытания твердосплавных инструментов проводились по отраслевым методикам различных предприятий и научно-исследовательских организаций.

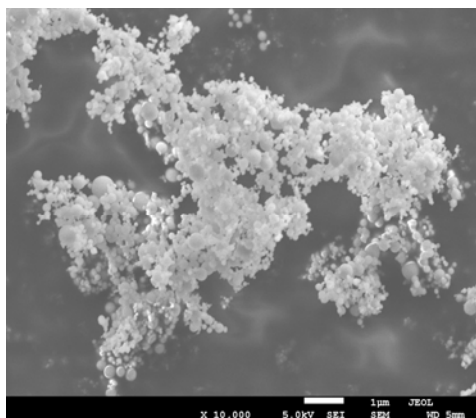
Результаты и обсуждение. В качестве модифицирующих добавок использовались нанопорошки окислов, полученные методом ударно-волнового синтеза [7]. Морфология порошков приведена на рис. 1, средний размер частиц изменяется от 0,008 мкм для ZrO_2 (минимум) до 0,1 мкм у Al_2O_3 (максимум).

Преимуществом предлагаемого способа получения модифицированных наночастицами твердосплавных композитов является сохранение базовой (стандартной) технологии без принципиальных изменений, требующих существенных затрат на оборудование и оснастку. Введение дополнительных операций и технологических приемов предварительной подготовки модифицирующих (легирующих) нанопорошков, а также особенности смесеприготовления, обеспечивает равномерное, однородное распределение наночастиц по объему твердосплавного композита, исключает агломерирование при внедрении наночастиц в прослойку (связующего) кобальта при спекании.

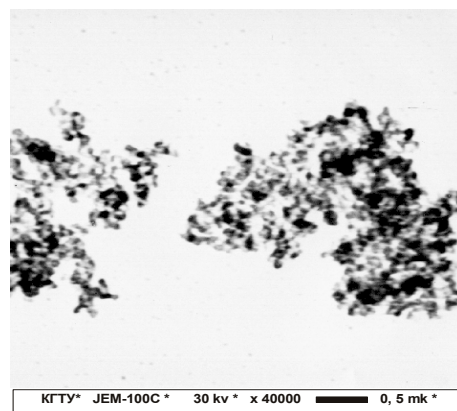
При проведении экспериментов, концентрация наночастиц в составе модифицированных твердых сплавов варьировалась в диапазоне от 0 до 0,5 % масс. Результаты экспериментов по определению физико-механических свойств, проведенных в условиях Кировградского завода твердых сплавов, представленные в табл. 1, 2 (твердые сплавы на основе карбида вольфрама) и табл. 3 (безвольфрамовые твердые сплавы) показывают, что введение в состав твердых сплавов керамических наночастиц способствует приросту прочностных характеристик в 1,5–1,8 раза. Изучение параметров микроструктуры сплава (табл. 2) показало стабильное снижение размера карбидных зерен у модифицированных сплавов, что можно объяснить торможением процессов перекристаллизации через кобальтовую фазу вследствие присутствия в ней ингибирующих добавок наночастиц керамики.

Наночастицы керамики Al_2O_3 или ZrO_2 в количестве 0,05–0,3 % по массе, не только дисперсно упрочняют кобальтовую прослойку и композит в целом (повышают трещиностойкость до 50 %, прочность на изгиб до 25 %), но и ее стойкость к температурным воздействиям, снижают адгезионное схватывание с обрабатываемым материалом.

Испытания образцов композитов WC-Co-наночастицы Al_2O_3 в условиях граничного трения по абразивной ленте также показали возможность улучшения такого эксплуатационного параметра твердых сплавов, как износостойкость (в 1,5 раза), за счет модифицирования прослойки кобальта более твердыми включениями керамики. Минимальные значения износа наблюдаются примерно в тех же областях добавок (~ 0,25 % масс.), которые обеспечивают прирост прочности. Дополнительный вклад в повышение износостойкости материала вносит, по-видимому, повышенная сопротивляемость истиранию, самого оксида алюминия, – его микротвердость: H_{μ} Al_2O_3 – 18–20 ГПа. Результаты проведенных стойкостных испытаний свидетельствуют также о возможности повышения скорости резания инструментами из модифицированных твердых сплавов по сравнению со стандартными составами [4].



а



б

Рис. 1. Морфология исходных нанопорошков оксида алюминия (а) и оксида циркония (б)

Таблица 1

Свойства твердых сплавов на основе карбида вольфрама, модифицированных добавками Al_2O_3 – нано

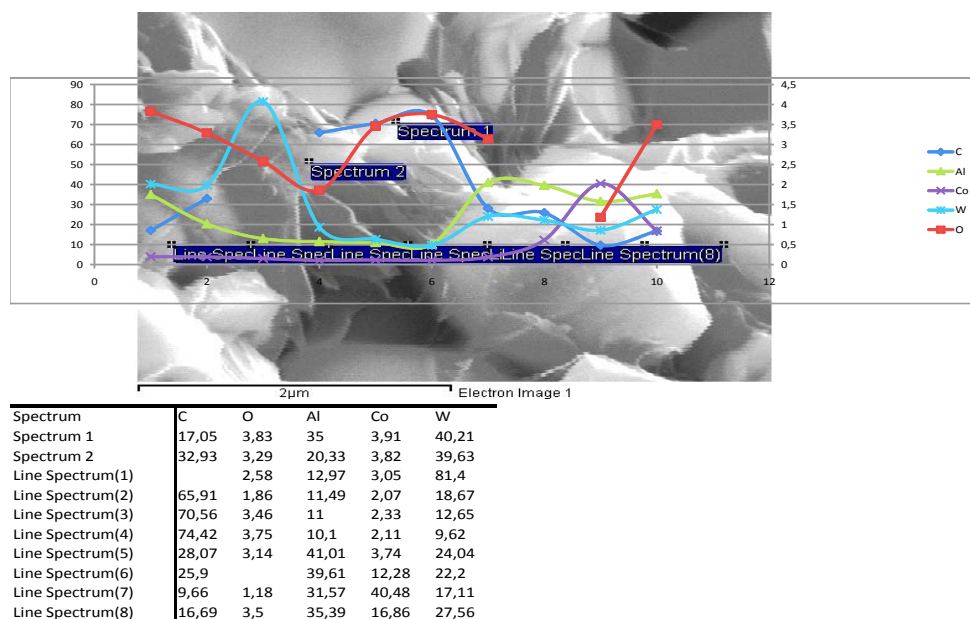
Марка сплава	Физико-механические характеристики			
	плотность, ρ , г/см ³	твердость, HRA	прочность на изгиб, МПа	Коэрцитивная сила, H_c , эрстед
BK6	14,66	89,8	1650	127
BK6*	14,68	89,5	1710	128
BK6	14,71	89,5	1430	122
BK6*	14,53	89,5	1850	123
BK8	14,28	89,5	1440	138
BK8*	14,61	89,3	1940	111
BK8	14,25	89,5	1280	132
BK8*	14,47	89,2	1740	106
BK15	14,1	86,5	2100	
BK15*	14,0	86,5	2240	
BK10 KC	14,49	87,3	2100	98
BK10KC*	14,21	87,4	2450	79
T15K6	11,12	91,5	1060	160
T15K6*	11,11	91,5	1330	162
T15K6**	11,09	91,5	1770	163

Примечание: * – сплав с добавками Al_2O_3 – нано.

Таблица 2

Параметры микроструктуры твердых сплавов на основе карбида вольфрама

Марка сплава	Параметры микроструктуры								d_{cp} , мкм	Фаза, Co , мкм
	пористость, %	содержание графита, % об.	размер зерна, мкм							
			1	2	3	4-5	6-7			
			фаза d_L , %							
ВК6	A 0,02	0,3	6	30	19	3	2	2,25	0,8–1	
ВК6*	A 0,08	0,2	33	41	15	11	—	2,10	—	
ВК8	A 0,08	0,6	30	29	21	17	3	2,47	—	
ВК8*	B 0,04	0,2	31	40	19	5	4	2,21	—	
ВК15	B 0,08	0,1	30	34	21	14	1	2,51	—	
ВК15*	A 0,02	0,2	35	41	17	7	—	2,33	—	
ВК10КС	A 0,02	0,4	8	12	27	30	21	4,03	—	
ВК10КС*	B 0,04	0,4	7	15	28	25	20	3,87	—	

Примечание: * – сплав с добавками Al_2O_3 – нано.Рис. 2. Распределение элементов по структуре твердосплавного композита WC-TiC-Co – Al_2O_3 – нано

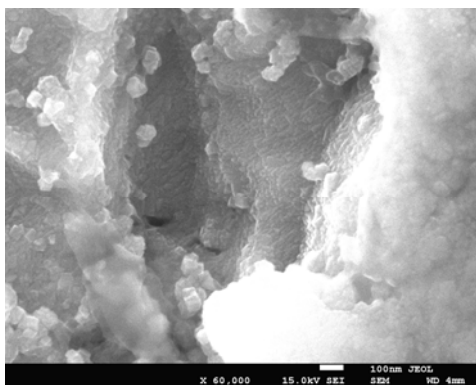


Рис. 3. Микроструктура фрагмента излома твердосплавного композита на основе WC-TiC-Co – (Al₂O₃-нано) (между карбидными зернами видны включения наночастиц)

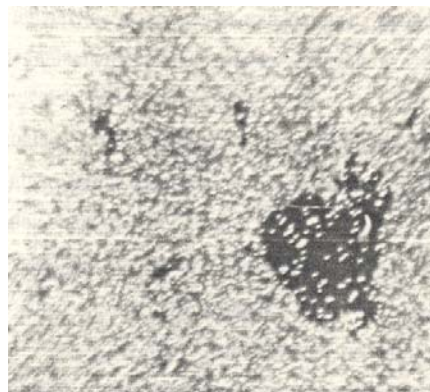


Рис. 4. Твердый сплав ВК – нанопорошки Al₂O₃. Распределение Al₂O₃ в объеме кобальтовой связи

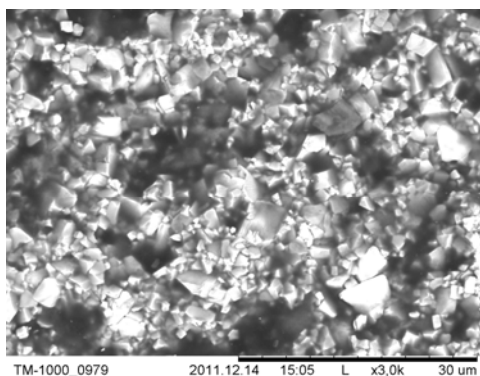


Рис. 5. Фрактограмма излома твердого сплава WC-Co- (Al₂O₃ – нано)

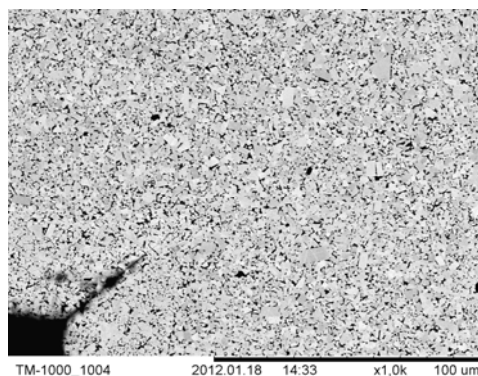


Рис. 6. Релаксация напряжений во фронте распространения трещины Палмквиста (от угла отпечатка пирамидки Виккерса)

Показатели твердости и плотности материала существенно не отличаются от базового материала и находятся на уровне: HRC 91,5-92; $\rho = 14,7\text{--}14,75 \text{ г/см}^3$; несколько увеличиваются значения микротвердости прослойки связующего материала – кобальта поскольку реализуется известный эффект дисперсного упрочнения на уровне фрагментов структуры Co–Al₂O₃.

Наличие таких фрагментов иллюстрируется результатами изучения микроструктуры – рис. 2–4. Изображения микроструктуры свидетельствует также об однородном распределении наноксид алюминия по объему твердосплавного материала.

Особый интерес, с точки зрения прогнозирования качества твердого сплава представляют данные исследований вязкости разрушения материала по методу Палмквиста (рис. 5, 6) в сочетании с изучением микроструктуры. Трещины, которые образуются в материале в результате внедрения индентора (алмазной пирамидки Виккерса), привлекают к себе внимание главным образом потому, что являются потенциальными носителями косвенной информации по прочности, эксплуатационной стойкости материала,

отражают изменения в механизмах разрушения, соответствующих различным типам структуры.

Причиной прерывистого развития магистральной трещины (рис. 6) вероятно, является релаксация напряжений, возникающих в ее фронте при взаимодействии с включениями Al₂O₃-нано в структуре твердого сплава (рис. 5). Необходимо в этой связи подчеркнуть, что появление ступенчатой, дискретной трещины приблизительно соответствует области добавок частиц 0,3 % масс. Оценочные расчеты по теоретической модели для WC-Co-Al₂O₃-нано (при содержании C₂~0,3 %) дают значение числа частиц Al₂O₃-нано, приходящихся на одно зерно WC ~ 30 частиц, т. е. концентрация частиц становится настолько высокой, что возрастает степень их контактности и конгломерирования, а это может приводить к охрупчиванию материала. Увеличение содержания легирующих добавок наночастиц свыше 0,3 % по массе представляется нецелесообразным.

Разработанные применительно к известным стандартным твердым сплавам математические модели, методики прогнозирования прочности, вязкости разрушения модифицированных твердых сплавов в зави-

симости от концентрации и объемных долей всех составляющих [4], были использованы (адаптированы) для оценки эффективности «внедрения» наночастиц в структуру кобальтовой связки вновь создаваемых твердых сплавов. По результатам расчетных и проведенных экспериментальных исследований такие наноструктурированные твердосплавные композиты с субмикронным карбидным зерном могут иметь следующий диапазон свойств: трещиностойкость по Палмквисту (коэффициент интенсивности напряжений) $K_{IC} = 20\text{--}21 \text{ МПа м}^{1/2}$; прочность на изгиб, $\sigma_{и} = 1800\text{--}2400 \text{ МПа}$ (для твердых сплавов разного состава).

Результаты измерений представленные в табл. 2, 3 преобразованные в графическую форму наглядно иллюстрируют, что на разных базовых марках твердого сплава WC – 6 % Co, WC – 8 % Co, WC – 15 % Co стабильно обеспечивается уменьшение среднего размера карбидного зерна (рис. 7) при введении наночастиц керамики.

Аналогичные эффекты были обнаружены на безвольфрамовых твердых сплавах КНТ 16, модифици-

рованных добавками наночастиц керамики (рис. 8, 9 и табл. 3).

Результаты измерений среднего размера карбонитридного зерна в безвольфрамовых твердых сплавах представленные в табл. 3 и преобразованные в графическую форму наглядно иллюстрируют, что эффективность ингибирующего воздействия повышается с увеличением концентрации добавок наночастиц и уменьшением их среднего размера.

Результаты многочисленных эксплуатационных испытаний физико-механических характеристик твердосплавных материалов и изделий (инструмента) на основе отечественных сплавов групп ВК, ТК, КНТ, подтвержденные актами испытаний, внедрения, протоколами и заключениями экспертных комиссий, показывают стабильный прирост основных характеристик (прочности, трещиностойкости, износостойкости) соответствие требований международных стандартов по показателям твердости, плотности, параметрам микроструктуры. Достоверность полученных результатов подтверждается так же тем, что они проводились независимыми специалистами и экспертами (в том числе в производственных условиях).

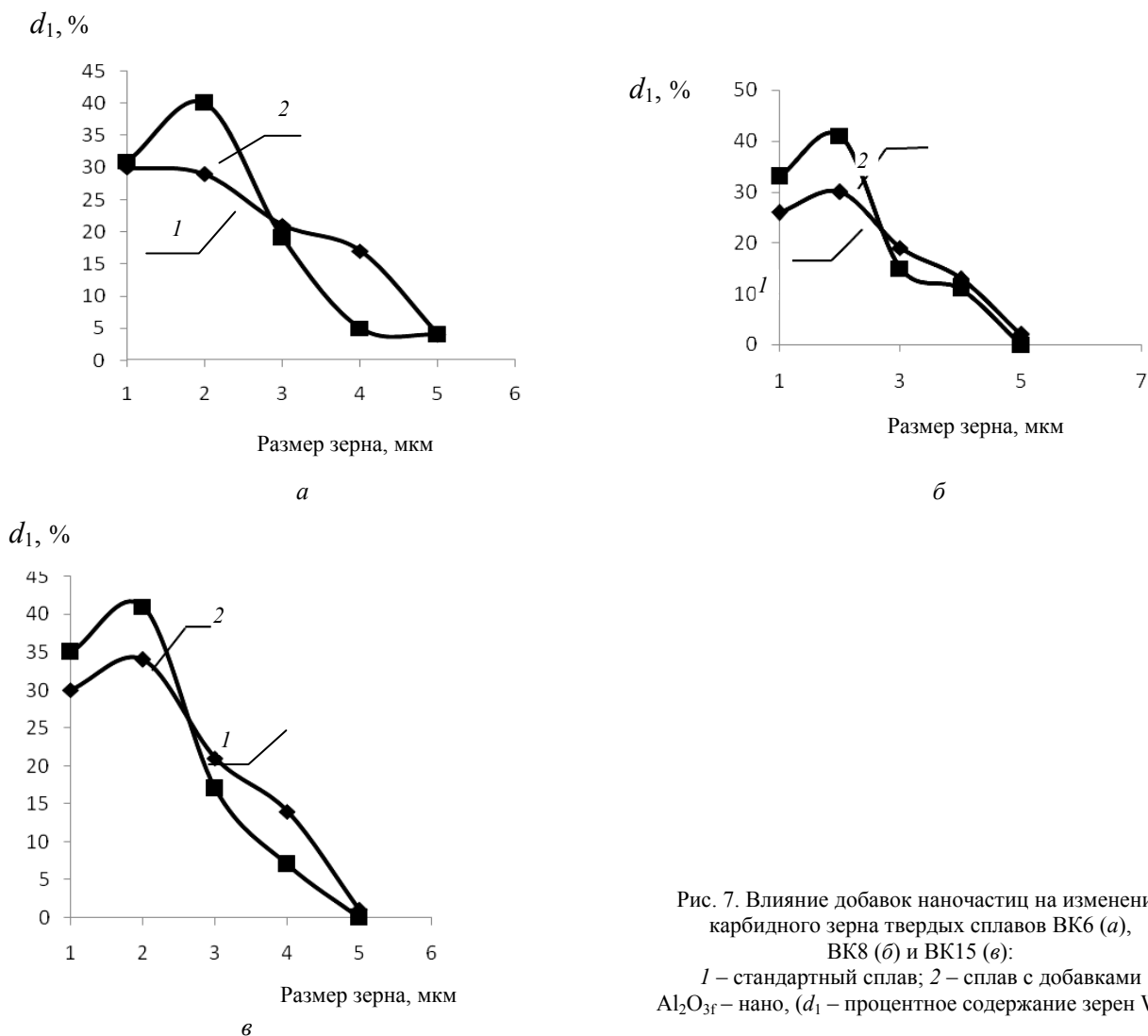
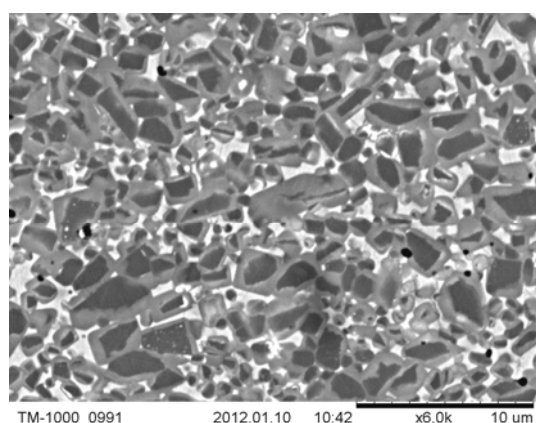
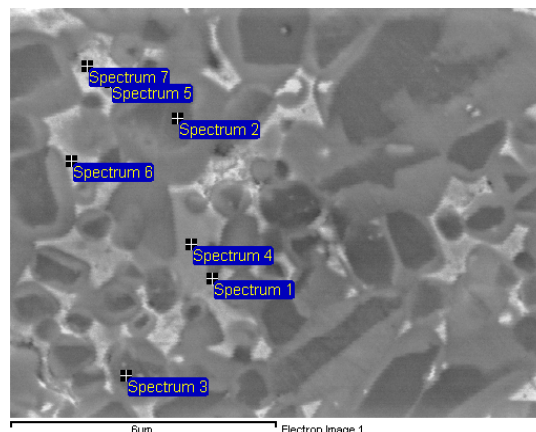


Рис. 7. Влияние добавок наночастиц на изменение карбидного зерна твердых сплавов ВК6 (а), ВК8 (б) и ВК15 (в):

1 – стандартный сплав; 2 – сплав с добавками $\text{Al}_2\text{O}_3\text{f}$ – нано, (d_1 – процентное содержание зерен WC)



а



б

Spectrum	Элементный состав спектров, масс %								
	C	Al	Si	Ti	Fe	Ni	Mo	W	Total
Spectrum 1	29.43			27.33		35.89	4.00	3.36	100.00
Spectrum 2	23.15			70.64			3.83	2.38	100.00
Spectrum 3	16.71			49.86		28.66	2.49	2.28	100.00
Spectrum 4	6.20	0.90	0.76	17.66		71.65		2.82	100.00
Spectrum 5	14.40			33.14		21.40	3.67	27.38	100.00
Spectrum 6	4.45	0.78	1.03	5.61	4.82	83.30			100.00
Spectrum 7			0.84	6.35	5.35	87.46			100.00

Рис. 8. Изображение микроструктуры (а) и результаты поэлементного анализа (б) сплава КНТ 16, модифицированного наночастицами

Таблица 3

Физико-механические свойства безвольфрамового твердого сплава состава TiCN-(Ni-Mo), дисперсноупрочненного Al₂O₃-нано

№ пп.	Содержание Al ₂ O ₃ -нано, масс. %	Прочность на изгиб, σ _и , МПа	Плотность, ρ, г/см ³	Твердость, HRA	Средний размер зерна TiCN, d, мкм	Параметры микро-структуры	Коэффициент стойкости при резании
1*	0	1200	5,80	89,5	2,7	A-04	1
2*	0,1	1370	5,76	89,2	2,23	A > % (30-40-16-13-1) A > 1 % (27-50-13-10) A > 1 % (40-46-14-1)	4.0
	0,2	1450	5,79	89,5	2,11		4.3
	0,3	1440	5,80	98,5	1,74		4.6
3*	0,1	1460	5,91	89,5	2,02	B 0.08 (33-38-25-4) A 0.02 (40-39-20-1) B 0.08 (44-44-12)	4.7
	0,2	1470	5,92	98,5	1,83		4.8
	0,3	1450	5,92	98,5	1,68		4.8
4*	0,1	1370	5,94	90,0	2,18	A-02 A-02 A-04	1,7
	0,2	1420	5,92	90,5	2,10		2,6
	0,3	1490	5,92	90,0	1,87		1,65

Примечание: 1* – базовый материал; 2* – добавки наночастиц вводились в порошковую смесь TiCN-(Ni-Mo) непосредственно при загрузке перед размолотом-смешиванием; 3* – после 18 часов размолот основной смеси TiCN-(Ni-Mo) в виде суспензии с дополнительным размешиванием в течение 2 часов; 4* – после 2 часов размолот основной смеси TiCN-(Ni-Mo) с дополнительным размешиванием в течение 18 часов.

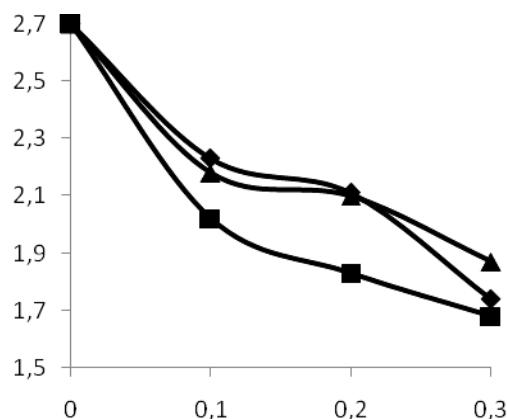


Рис. 9. Влияние содержания нанодобавок на средний размер зерна карбонитрида титана:

■ – размер частиц Al_2O_3 – нано = 0,05 μm ; ▲ – размер частиц Al_2O_3 – нано = 0,08 μm ;
◆ – размер частиц Al_2O_3 – нано = 0,1 μm

Использование нанопорошков для реализации нового комплекса функциональных свойств не имеет альтернативы при создании твердосплавных дисперсноупрочненных композиционных материалов. Результаты проведенных комплексных параметрических исследований свидетельствуют, по нашему мнению, о том, что у этих композитов реализуется известный в материаловедении принцип «состав – структура – свойства». Применение разработанных составов твердых сплавов, технологии их изготовления обеспечивает изменение структурных параметров, толщины кобальтовой прослойки связующего, снижение среднего размера карбидного зерна и, как результат, дисперсное упрочнение связующего и твердосплавного композита в целом; увеличение (по сравнению со стандартными материалами) прочности на изгиб на 25–30 %; трещиностойкости на 50 %; износостойкости (стойкость к истиранию) в 2–2,5 раза. За счет наличия в структуре твердого сплава нанопорошков оксида алюминия повышается стойкость режущего инструмента в 1,3–1,8 раза по сравнению с исходным сплавом.

Библиографические ссылки

1. Панов В. С., Чувилин А. М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. М.: МИСИС, 2001. 452 с.
2. Godse R., Gurland J. Applicability of the critical strength criterion to WC–Co // J. Of Mater. Science and Engineering. 1988. A.106, p. 331–336.
3. Андриевский Р. А., Глезер А. М. Прочность наноструктур, УФН, 2009, 179:4, 337–358.
4. Гордеев Ю. И., Абкарян А. К., Зеер Г. М. Конструирование и исследование твердосплавных и керамических композитов, модифицированных наночастицами // Перспективные материалы. 2012. № 5. С. 76–88.

5. Gordeev Y., Bucaemsky A., Seher G., Teremov S. Microstructure and properties of various cermets strengthening by ultrafine chock-wave particles // Powder metallurgy world congress and exhibition//Spain. 1998. Vol. 4. P. 140–146.

6. Использование нанопорошка Al_2O_3 в качестве ингибитора роста зерна в сплаве ВК8 / С. В. Николенко, М. И. Дворник, М. А. Пугачевский и др. // Вопросы материаловедения. 2008. № 2 (54). С. 100–105.

7. Белошапко А. Г., Букаемский А. А., Ставер А. М. Образование ультрадисперсных соединений при ударноволновом нагружении пористого алюминия. Исследование полученных частиц // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 4. С. 93–98.

References

1. Panov V. S., Chuvilin A. M. *Tekhnologiya i svoystva spechennykh tverdykh spлавov i izdeliy iz nikh* (Technology and properties of sintered hard alloys and products made of them). Moscow, MISIS, 2001, 452 p.
2. Godse R., Gurland J. J. *Of Mater. Science and Engineering*. 1988, A.106, p. 331–336.
3. Andriyevskiy R. A., Glezer A. M. *Prochnost' nanostruktur*, UFN, 2009, 179:4, 337–358.
4. Gordeyev Yu. I., Abkaryan A. K., Zeyer G. M. *Perspektivnyye materialy*. 2012, № 5, p. 76–88.
5. Gordeev Y., Bucaemsky A., Seher G., Teremov S. Microstructure and properties of various cermets strengthening by ultrafine chock-wave particles // Powder metallurgy world congress and exhibition//Spain. 1998, vol. 4, p. 140–146.
6. Nikolenko S. V., Dvornik M. I., Pugachevskiy M. A. et al. *Voprosy materialovedeniya*. 2008, № 2 (54), p. 100–105.
7. Beloshapko A. G., Bukayemskiy A. A., Staver A. M. *Fizika goreniya i vzryva*. 1990, 26 (4), p. 93–98.

© Гордеев Ю. И., Абкарян А. К., Зеер Г. М., Лепешев А. А., 2013

УДК 62.52

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Н. Д. Демиденко

СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН

Россия, 660049, Красноярск, просп. Мира, 53. E-mail: tpya74@mail.ru

Сформулирована краевая задача для нестационарных режимов трубчатых печей с применением законов сохранения энергии, массы и количества движения. На основе этой модели поставлены задачи оптимального управления для основных управляющих параметров. С помощью вариационных методов получили и проанализировали необходимые условия оптимальности для выбранных управляющих функций. Полученная сопряженная краевая задача по структуре аналогична исходной краевой задаче. При этом множители Лагранжа заданы в конечный момент времени, что обуславливает особенности на численную реализацию задачи оптимального управления. Предложен численный алгоритм решения задачи оптимизации, который включает в себя решения двух краевых задач и антиградиентный спуск по вариационным равенствам к минимуму. Сформулирована и решена задача оптимального управления технологическими режимами трубчатых печей, как объектов с распределенными параметрами.

Ключевые слова: оптимальное управление, система с распределенными параметрами, необходимые условия оптимальности, сопряженная краевая задача.

OPTIMAL CONTROL OF TECHNOLOGICAL FURNACES REGIMES

N. D. Demidenko

SDTB «Nauka» KSC of the SB RAS

53 Mira prosp., Krasnoyarsk, 660049, Russia. E-mail: tpya74@mail.ru

The author formulates the boundary value problem for the stationary modes of the tube furnaces with the use of the laws of energy conservation, mass and momentum. On the basis of this model the optimal control problem for the main control parameters is formulated. With the help of variational methods the author analyzed and obtained the necessary optimal conditions for the selected control functions. The obtained conjugate boundary value problem is similar in structure to the original boundary value problem. In this case, the Lagrange multipliers are given at the finite time, which provide for the particularities on the numerical implementation of the optimal control problem. The author proposes a numerical algorithm for solution of the optimization problem, which involves solution of two problems and antigradiently incline on the variational equations to the minimum. The problem of optimal control of technological regimes of the tube furnaces as objects with distributed parameters.

Keywords: optimal control, a system with distributed parameters, necessary conditions of optimality, conjugate boundary value problem.

Автоматизированная система регулирования (АСР) технологическими печами предназначена для поддержания оптимальной температуры нагреваемого продукта на выходе из печи с одновременным снижением расхода жидкого топлива и уменьшением загрязнения окружающей среды продуктами сгорания, предусматривающая максимальное использование топливного газа.

В качестве объекта управления выбрана секция С-100 установки ЛК-6У по переработке нефти, состоящая из трех трубчатых печей: П-101, П-102, П-103. Печь П-101 состоит из 8 секций, расположенных в виде двух блоков по четыре секции друг против друга и отдельно стоящих девятой и десятой секций. Все секции печи П-101 (первая и пятая) предназначены для нагрева горячей циркулирующей струи колонны К-101, остальные восемь секций предназначены для нагрева сырья колонны К-102. Печь П-102 состо-

ит из одной отдельно стоящей секции. Она предназначена для поддержания температуры низа стабилизационной колонны К-104. Печь П-103 состоит из одной отдельно стоящей секции. Она может быть использована для нагрева горячей циркулирующей струи колонны К-101 или для нагрева сырья колонны К-102.

АСР используется для регулирования разряжения в печах по всему тракту движения дымовых газов с целью поддержания оптимального коэффициента избытка воздуха и обеспечения равномерности работы горелок. Следящая АСР перепада давления «пармазут» предназначена для автоматического изменения давления пара, идущего на распыление жидкого топлива в зависимости от изменения давления жидкого топлива.

Нормальный технологический режим работы печей поддерживается путем правильной организации

горения топлива в горелках и контролируется по приборам и техническим характеристикам печи.

Температура нагреваемого сырья поддерживается путем автоматического регулирования количества топлива, сжигаемого в печи. Повышение температуры нагрева продукта в печах выше нормы не допустимо, так как это может привести к выходу из строя змеевика печи или к коксованию продукта.

Температура на «перевале» при эксплуатации должна поддерживаться в каждой секции за счет обеспечения равномерной работы всех горелок во всех радиантных камерах каждой печи. Величина температуры определяется показаниями термодатчиков, установленных на перевалах печей.

Ниже приводится математическая модель нестационарного процесса горения в трубчатых печах [1].

1. Уравнения нестационарного горения. Теория горения капли жидкого топлива в [1] развита для случая молекулярных процессов горения. Ее можно распространить на случай конвективного теплообмена. Исходя из одномерности движения потоков, математическая модель нестационарного горения в технологической печи может быть представлена следующими уравнениями [2-4]:

1. Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

где ρ – массовая плотность смеси; u – скорость движения.

Для покомпонентной модели процесса горения уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{\partial(\rho x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho x u)}{\partial l} = -\frac{\rho x}{\tau}, \quad (2)$$

здесь l – линейный размер; x – концентрация горючего вещества в смеси ($0 \leq x \leq 1$); τ – время сгорания.

2. Уравнение движения в виде

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial l} \right) + \frac{\partial P}{\partial l} = 0. \quad (3)$$

3. Уравнение сохранения энергии

$$\rho T_n \left(\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial l} \right) = \frac{\rho x}{\tau} q - Q(T_n) + K_1 (T_c - T_n), \quad (4)$$

где q – теплота сгорания топлива; $Q(T_n)$ – потери на излучение; S – энтропия, причем $S = C_v \ln \frac{P}{\rho^\gamma}$

($\gamma = 1.0 - 1.4$, так как для жидкостей различие между C_v и C_p незначительно); T_c – температура сырья (нефтепродукта в радиантных трубопроводах печи); K_1 – коэффициент теплопередачи для рабочего потока; T_n – температура продуктов сгорания.

4. Уравнение теплообмена между нагреваемым сырьем и нагревательным газом

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} - w \frac{\partial T_c}{\partial l} = K_2 (T_n - T_c) - Q(T_n), \quad (5)$$

где K_2 – коэффициент теплопередачи для стенки печи.

Уравнения (1)–(5) представляют собой математическую модель теплового процесса печи.

Дополним систему (1)–(5) уравнением состояния

$$\frac{P}{\rho} = R T_n, \quad (6)$$

где R – газовая постоянная.

2. Постановка задачи. Рассмотрим следующую тепломассообменную задачу для процессов в трубчатой печи. Для этого приведем систему (1)–(6) к нормальной форме:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial l} - \rho \frac{\partial u}{\partial l}, \\ \frac{\partial x}{\partial t} = -u \frac{\partial x}{\partial l} - \frac{x}{\tau}, \\ \frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial l} - R \frac{\partial T_n}{\partial l} - \frac{R T_n}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial l}, \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} = (1 - \gamma) T_n \frac{\partial u}{\partial l} - u \frac{\partial T_n}{\partial l} + \\ + \frac{xq}{C_v \tau} - \frac{Q(T_n)}{C_v \rho} + K_1 (T_c - T_n), \\ \frac{\partial T_c}{\partial t} = -w \frac{\partial T_c}{\partial l} + K_2 (T_n - T_c) - Q(T_n). \end{cases} \quad (7)$$

Дополним систему (7) начальными и граничными условиями

нач. усл.	гран. усл.	
$\rho(l, 0) = \varphi_1(l),$	$\rho(0, t) = \psi_1(t),$	
$x(l, 0) = \varphi_2(l),$	$x(0, t) = \psi_2(t),$	
$u(l, 0) = \varphi_3(l),$	$u(0, t) = \psi_3(t),$	(8)
$T_n(l, 0) = \varphi_4(l),$	$T_n(0, t) = \psi_4(t),$	
$T_c(l, 0) = \varphi_5(l),$	$T_c(L, t) = \psi_5(t).$	

Здесь температура сырья задается в точке $l = L$, так как сырье подается сверху в печь, и таким образом, имеем противоточный технологический процесс.

В качестве управлений возьмем изменение плотности горючего v_1 , концентрации v_2 , скорости v_3 , температур дымовых газов v_4 и сырья v_5 . На управления наложим следующие ограничения:

$$v_{i \min} \leq v_i \leq v_{i \max}, \quad i = \overline{1, 5}. \quad (9)$$

Введя фиктивные управления z_i , $i = \overline{1, 5}$, сведем неравенства (9) к равенствам

$$(v_{i \max} - v_i)(v_i - v_{i \min}) - z_i^2 = 0, \quad i = \overline{1, 5}. \quad (10)$$

Связь граничных условий с управлениями представлена ниже:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho(0, t)}{\partial t} &= b_1 v_1(t), & \frac{\partial x(0, t)}{\partial t} &= b_2 v_2(t), \\ \frac{\partial u(0, t)}{\partial t} &= b_3 v_3(t), & \frac{\partial T_n(0, t)}{\partial t} &= b_4 v_4(t), \\ \frac{\partial T_c(0, t)}{\partial t} &= b_5 v_5(t). \end{aligned}$$

Задача оптимального управления формулируется следующим образом. Найти такие $v_i(t)$, $i = \overline{1,5}$ из промежутков (9), которые в силу систем (7)–(8) доставляют минимум критерию качества

$$\int_0^T \int_0^L (T_c(l,t) - T_c^*(l,t))^2 dl dt, \quad (11)$$

где T_c^* – заданная температура сырья на выходе печи; T – время управления.

3. Необходимые условия оптимальности. Введем параметрические переменные, которые представляют основную особенность уравнений в нормальной форме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial l} &= \zeta^{(1)}, & \frac{\partial x}{\partial l} &= \zeta^{(2)}, & \frac{\partial u}{\partial l} &= \zeta^{(3)}, \\ \frac{\partial T_n}{\partial l} &= \zeta^{(4)}, & \frac{\partial T_c}{\partial l} &= \zeta^{(5)}. \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом (12) система (7) будет иметь вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -u\zeta^{(1)} - \rho\zeta^{(3)} \equiv X_1, \\ \frac{\partial x}{\partial t} = -u\zeta^{(2)} - \frac{x}{\tau} \equiv X_2, \\ \frac{\partial u}{\partial t} = -u\zeta^{(3)} - R\zeta^{(4)} - \frac{RT_n}{\rho}\zeta^{(1)} \equiv X_3, \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} = (1-\gamma)T_n\zeta^{(3)} - u\zeta^{(4)} + \\ + \frac{xq}{C_v\tau} - \frac{Q(T_n)}{\rho T_n} + k_1(T_c - T_n) \equiv X_4, \\ \frac{\partial T_c}{\partial t} = -u\zeta^{(5)} + k_2(T_n - T_c) - Q(T_n) \equiv X_5. \end{cases} \quad (13)$$

В уравнениях (13) параметрические переменные и управления входят формально одинаковым образом. Однако между ними имеются принципиальное различие, так как эти переменные играют различную роль. Дело в том, что управления задаются произвольно, а $\zeta^{(i)}$ не задаются, а определяются по известным управлениям в результате решения задачи.

Для получения необходимых условий оптимальности рассмотрим вспомогательный функционал [3]

$$I = I_1 + I_2 = \iint_{\Omega} \tilde{L} dl dt + \int_{\partial\Omega} \tilde{l} dt,$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{L} &= \xi_1 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} - X_1 \right) + \xi_2 \left(\frac{\partial x}{\partial t} - X_2 \right) + \xi_3 \left(\frac{\partial u}{\partial t} - X_3 \right) + \\ &+ \xi_4 \left(\frac{\partial T_n}{\partial t} - X_4 \right) + \xi_5 \left(\frac{\partial T_c}{\partial t} - X_5 \right) + \eta_1 \left(\frac{\partial \rho}{\partial l} - \zeta^{(1)} \right) + \\ &+ \eta_2 \left(\frac{\partial x}{\partial l} - \zeta^{(2)} \right) + \eta_3 \left(\frac{\partial u}{\partial l} - \zeta^{(3)} \right) + \eta_4 \left(\frac{\partial T_n}{\partial l} - \zeta^{(4)} \right) + \\ &+ \eta_5 \left(\frac{\partial T_c}{\partial l} - \zeta^{(5)} \right) + (T_c - T_c^*)^2, \end{aligned}$$

$\xi_i(l,t)$, $\eta_i(l,t)$, $(i = \overline{1,5})$ – функции Лагранжа, $\tilde{l}$ определена ниже.

Вычислим вариацию функционала I_1 при оптимальных ρ , x , u , T_n , T_c . Окончательно вариация функционала I_1 выглядит так:

$$\begin{aligned} \delta I_1 &= \\ &= \int_0^T \int_0^L \left[\left(\xi_1 \zeta^{(3)} - \xi_3 \zeta^{(1)} \right) \frac{RT_n}{\rho^2} - \xi_4 \frac{Q(T_n)}{C_v \rho^2} - \frac{\partial \xi_1(l,t)}{\partial t} - \frac{\partial \eta_1(l,t)}{\partial l} \right] \times \\ &\times \delta \rho(l,t) + \left(\xi_2 \frac{1}{\tau} - \xi_4 \frac{q}{C_v \tau} - \frac{\partial \xi_2(l,t)}{\partial t} - \frac{\partial \eta_2(l,t)}{\partial l} \right) \delta x(l,t) + \\ &+ \left(\xi_1 \zeta^{(1)} + \xi_2 \zeta^{(2)} + \xi_3 \zeta^{(3)} + \xi_4 \zeta^{(4)} - \frac{\partial \xi_3(l,t)}{\partial t} - \frac{\partial \eta_3(l,t)}{\partial l} \right) \delta u(l,t) + \\ &+ \left(\xi_3 \frac{R}{\rho} \zeta^{(1)} - \xi_4 \left((1-\gamma) \zeta^{(3)} + \left(-\frac{1}{C_v \rho} - 1 \right) \frac{\partial Q(T_n)}{\partial T_n} - k_1 \right) - \right. \\ &\quad \left. - \xi_5 k_2 - \frac{\partial \xi_4(l,t)}{\partial t} - \frac{\partial \eta_4(l,t)}{\partial l} \right) \delta T_n(l,t) + \\ &+ \left(\xi_5 k_2 + 2T_c - 2T_c^* + \xi_4 k_1 - \frac{\partial \xi_5(l,t)}{\partial t} - \frac{\partial \eta_5(l,t)}{\partial l} \right) \delta T_c(l,t) + \\ &+ \left(\xi_1 u + \xi_3 \frac{RT_n}{\rho} - \eta_1 \right) \delta \zeta^{(1)} + (\xi_2 u - \eta_2) \delta \zeta^{(2)} + \\ &+ (\xi_1 \rho + \xi_3 u - \xi_4 (1-\gamma) T_n - \eta_3) \delta \zeta^{(3)} + \\ &+ (\xi_3 R + \xi_4 u - \eta_4) \delta \zeta^{(4)} + (\xi_5 \omega - \eta_5) \delta \zeta^{(5)} \Big] dl dt. \end{aligned}$$

Собираем слагаемые при одинаковых вариациях функций и, используя аргументации теории вариационных исчислений, получим сопряженную систему уравнений относительно функций Лагранжа

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi_1}{\partial t} &= \xi_1 \zeta^{(3)} - \xi_3 \zeta^{(1)} \frac{RT_n}{\rho^2} - \xi_4 \frac{Q(T_n)}{C_v \rho^2} - \frac{\partial \eta_1}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial t} &= \xi_2 \frac{1}{\tau} - \xi_4 \frac{q}{C_v \tau} - \frac{\partial \eta_2}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_3}{\partial t} &= \xi_1 \zeta^{(1)} + \xi_2 \zeta^{(2)} + \xi_3 \zeta^{(3)} + \xi_4 \zeta^{(4)} - \frac{\partial \eta_3}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_4}{\partial t} &= \xi_3 \frac{R}{\rho} \zeta^{(1)} - \xi_4 \left((1-\gamma) \zeta^{(3)} + \right. \\ &\quad \left. + \left(-\frac{1}{C_v \rho} - 1 \right) \frac{\partial Q(T_n)}{\partial T_n} - k_1 \right) - \xi_5 k_2 - \frac{\partial \eta_4}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_5}{\partial t} &= \xi_5 k_2 + 2T_c - 2T_c^* + \xi_4 k_1 - \frac{\partial \eta_5}{\partial l}; \\ \eta_1 &= \xi_1 u + \xi_3 \frac{RT_n}{\rho}, \quad \eta_2 = \xi_2 u, \\ \eta_3 &= \xi_1 \rho + \xi_3 u - \xi_4 (1-\gamma) T_n, \\ \eta_4 &= \xi_3 R + \xi_4 u, \quad \eta_5 = \xi_5 \omega. \end{aligned} \quad (14)$$

С помощью (15) исключим в (14) $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5$ и, имея в виду, что

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta_1(l, t)}{\partial l} &= u \frac{\partial \xi_1(l, t)}{\partial l} + \xi_1 \frac{\partial u(l, t)}{\partial l} + \frac{RT_n}{\rho} \frac{\partial \xi_3(l, t)}{\partial l} + \\ &+ \frac{\xi_3 R}{\rho} \frac{\partial T_n(l, t)}{\partial l} - \frac{\xi_3 RT_n}{\rho^2} \frac{\partial \rho(l, t)}{\partial l}, \\ \frac{\partial \eta_2(l, t)}{\partial l} &= u \frac{\partial \xi_2(l, t)}{\partial l} + \xi_2 \frac{\partial u(l, t)}{\partial l}, \\ \frac{\partial \eta_3(l, t)}{\partial l} &= \rho \frac{\partial \xi_1(l, t)}{\partial l} + \xi_1 \frac{\partial \rho(l, t)}{\partial l} + u \frac{\partial \xi_3(l, t)}{\partial l} + \\ &+ \xi_3 \frac{\partial u(l, t)}{\partial l} - (1 - \gamma) \left(T_n \frac{\partial \xi_4(l, t)}{\partial l} + \xi_4 \frac{\partial T_n(l, t)}{\partial l} \right), \\ \frac{\partial \eta_4(l, t)}{\partial l} &= R \frac{\partial \xi_3(l, t)}{\partial l} + \xi_4 \frac{\partial u(l, t)}{\partial l} + u \frac{\partial \xi_4(l, t)}{\partial l}, \\ \frac{\partial \eta_5(l, t)}{\partial l} &= \omega \frac{\partial \xi_5(l, t)}{\partial l}.\end{aligned}$$

окончательно получим сопряженную систему относительно $\xi_i, i = \overline{1, 5}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \xi_1}{\partial t} &= -\xi_4 \frac{Q(T_n)}{C_v \rho^2} - u \frac{\partial \xi_1(l, t)}{\partial l} - \\ &- \frac{RT_n}{\rho} \frac{\partial \xi_3(l, t)}{\partial l} - \frac{\xi_3 R}{\rho} \frac{\partial T_n(l, t)}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial t} &= \xi_2 \frac{1}{\tau} - \xi_4 \frac{q}{C_v \tau} - u \frac{\partial \xi_2(l, t)}{\partial l} - \xi_2 \frac{\partial u(l, t)}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_3}{\partial t} &= \xi_2 \frac{\partial x(l, t)}{\partial l} - \rho \frac{\partial \xi_1(l, t)}{\partial l} - u \frac{\partial \xi_3(l, t)}{\partial l} + \\ &+ (1 - \gamma) T_n \frac{\partial \xi_4}{\partial l} + (2 - \gamma) \xi_4 \frac{\partial T_n(l, t)}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_4}{\partial t} &= \xi_4 \frac{R}{\rho} \frac{\partial \rho(l, t)}{\partial l} + (\gamma - 2) \xi_4 \frac{\partial u(l, t)}{\partial l} + \\ &+ \frac{\xi_4 \gamma}{C_v \rho} \frac{\partial Q(T_n)}{\partial T_n} \xi_5 k_2 - R \frac{\partial \xi_3(l, t)}{\partial l} - u \frac{\partial \xi_4(l, t)}{\partial l} - k_1 \xi_4, \\ \frac{\partial \xi_5}{\partial t} &= \xi_5 k_2 + 2(T_c - T_c^*) + \omega \frac{\partial \xi_5(l, t)}{\partial l} + \xi_4 k_1.\end{aligned}\quad (16)$$

Начальные условия

$$\xi_i(l, T) = 0, \quad i = \overline{1, 5}. \quad (17)$$

Аналогично проведем преобразования вспомогательного функционала I_2 на границе области, имея в виду, что

$$\begin{aligned}\tilde{I} &= \lambda^{(1)} \left[\frac{\partial \rho(0, t)}{\partial t} - b_1 v_1(t) \right] + \lambda^{(2)} \left[\frac{\partial x(0, t)}{\partial t} - b_2 v_2(t) \right] + \\ &+ \lambda^{(3)} \left[\frac{\partial u(0, t)}{\partial t} - b_3 v_3(t) \right] + \lambda^{(4)} \left[\frac{\partial T_n(0, t)}{\partial t} - b_4 v_4(t) \right] + \\ &+ \lambda^{(5)} \left[\frac{\partial T_c(L, t)}{\partial t} - b_5 v_5(t) \right] + \\ &+ \mu^{(1)} \left[(v_{1\max} - v_1(t))(v_1(t) - v_{1\min}) - z_1^2(t) \right] +\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&+ \mu^{(2)} \left[(v_{2\max} - v_2(t))(v_2(t) - v_{2\min}) - z_2^2(t) \right] + \\ &+ \mu^{(3)} \left[(v_{3\max} - v_3(t))(v_3(t) - v_{3\min}) - z_3^2(t) \right] + \\ &+ \mu^{(4)} \left[(v_{4\max} - v_4(t))(v_4(t) - v_{4\min}) - z_4^2(t) \right] + \\ &+ \mu^{(5)} \left[(v_{5\max} - v_5(t))(v_5(t) - v_{5\min}) - z_5^2(t) \right].\end{aligned}$$

$\lambda^{(i)}(t), \mu^{(i)}(t) \quad (i = \overline{1, 5})$ – функции Лагранжа.

При этом получим:

$$\begin{aligned}\delta I_2 &= \int_0^T \left[\eta_1(L, t) \delta \rho(L, t) - \left(\eta_1(0, t) + \frac{d\lambda^{(1)}}{dt} \right) \delta \rho(0, t) + \right. \\ &+ \eta_2(L, t) \delta x(L, t) - \left(\eta_2(0, t) + \frac{d\lambda^{(2)}}{dt} \right) \delta x(0, t) + \\ &+ \eta_3(L, t) \delta u(L, t) - \left(\eta_3(0, t) + \frac{d\lambda^{(3)}}{dt} \right) \delta u(0, t) + \\ &+ \eta_4(L, t) \delta T_n(L, t) - \left(\eta_4(0, t) + \frac{d\lambda^{(4)}}{dt} \right) \delta T_n(0, t) + \\ &+ \eta_5(L, t) \delta T_c(L, t) - \left(\eta_5(0, t) + \frac{d\lambda^{(5)}}{dt} \right) \delta T_c(0, t) + \\ &+ \left(-\lambda^{(1)} b_1 + \mu^{(1)} (v_{1\max} - 2v_1(t) + v_{1\min}) \right) \delta v_1(t) + \\ &+ \left(-\lambda^{(2)} b_2 + \mu^{(2)} (v_{2\max} - 2v_2(t) + v_{2\min}) \right) \delta v_2(t) + \\ &+ \left(-\lambda^{(3)} b_3 + \mu^{(3)} (v_{3\max} - 2v_3(t) + v_{3\min}) \right) \delta v_3(t) + \\ &+ \left(-\lambda^{(4)} b_4 + \mu^{(4)} (v_{4\max} - 2v_4(t) + v_{4\min}) \right) \delta v_4(t) + \\ &+ \left(-\lambda^{(5)} b_5 + \mu^{(5)} (v_{5\max} - 2v_5(t) + v_{5\min}) \right) \delta v_5(t) - \\ &- 2\mu^{(1)} z_1(t) \delta z_1(t) - 2\mu^{(2)} z_2(t) \delta z_2(t) - 2\mu^{(3)} z_3(t) \times \\ &\times \delta z_3(t) - 2\mu^{(4)} z_4(t) \delta z_4(t) - 2\mu^{(5)} z_5(t) \delta z_5(t) \Big] dt,\end{aligned}\quad (18)$$

откуда

$$\begin{aligned}\eta_1(0, t) + \frac{d\lambda^{(1)}}{dt} &= 0, \quad \eta_2(0, t) + \frac{d\lambda^{(2)}}{dt} = 0, \\ \eta_3(0, t) + \frac{d\lambda^{(3)}}{dt} &= 0, \quad \eta_4(0, t) + \frac{d\lambda^{(4)}}{dt} = 0, \\ \eta_5(L, t) + \frac{d\lambda^{(5)}}{dt} &= 0\end{aligned}$$

или с учетом (15) имеем

$$\begin{aligned}\frac{d\lambda^{(1)}}{dt} &= -\xi_1(0, t) u(0, t) - \xi_3(0, t) \frac{RT_n(0, t)}{\rho(0, t)}, \\ \frac{d\lambda^{(2)}}{dt} &= -\xi_2(0, t) u(0, t), \\ \frac{d\lambda^{(3)}}{dt} &= -\xi_1(0, t) \rho(0, t) - \xi_3(0, t) + \xi_4(0, t) (1 - \gamma) T_n(0, t), \\ \frac{d\lambda^{(4)}}{dt} &= -\xi_3(0, t) R - \xi_4(0, t) u(0, t),\end{aligned}$$

$$\frac{d\lambda^{(5)}}{dt} = -\xi_5(L, t)\omega. \quad (19)$$

Для системы (19) начальные условия следующие:

$$\begin{aligned} \lambda^{(1)}(T) = 0, \quad \lambda^{(2)}(T) = 0, \quad \lambda^{(3)}(T) = 0, \\ \lambda^{(4)}(T) = 0, \quad \lambda^{(5)}(T) = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

кроме того,

$$\begin{aligned} \eta^{(1)}(L, t) = 0, \quad \eta^{(2)}(L, t) = 0, \quad \eta^{(3)}(L, t) = 0, \\ \eta^{(4)}(L, t) = 0, \quad \eta^{(5)}(0, t) = 0 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \xi_1(L, t)u(L, t) + \xi_3(L, t)\frac{RT_n(L, t)}{\rho(L, t)} = 0, \\ \xi_2(L, t)u(L, t) = 0, \\ \xi_1(L, t)\rho(L, t) + \xi_3(L, t)u(L, t) - (1-\gamma)\xi_4(L, t)T_n(L, t) = 0, \\ \xi_3(L, t)R + \xi_4(L, t)u(L, t) = 0, \\ \xi_5(0, t)\omega = 0. \end{aligned}$$

Из (18) также следует, что

$$\begin{aligned} \mu^{(1)}z_1(t) = 0, \quad \mu^{(2)}z_2(t) = 0, \quad \mu^{(3)}z_3(t) = 0, \\ \mu^{(4)}z_4(t) = 0, \quad \mu^{(5)}z_5(t) = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} L_1 &\equiv -\lambda^{(1)}b_1 + \mu^{(1)}(v_{1\max} - 2v_1(t) + v_{1\min}) = 0, \\ L_2 &\equiv -\lambda^{(2)}b_2 + \mu^{(2)}(v_{2\max} - 2v_2(t) + v_{2\min}) = 0, \\ L_3 &\equiv -\lambda^{(3)}b_3 + \mu^{(3)}(v_{3\max} - 2v_3(t) + v_{3\min}) = 0, \\ L_4 &\equiv -\lambda^{(4)}b_4 + \mu^{(4)}(v_{4\max} - 2v_4(t) + v_{4\min}) = 0, \\ L_5 &\equiv -\lambda^{(5)}b_5 + \mu^{(5)}(v_{5\max} - 2v_5(t) + v_{5\min}) = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Таким образом, мы получим систему (16) с начальными условиями (17) и граничными условиями (19)-(22). Из (21) следует: если $z_i \equiv 0$, $i = \overline{1, 5}$, то управления $v_i(t)$, $i = \overline{1, 5}$ принимают граничные значения $v_{i\min}$ или $v_{i\max}$. Если же $\mu^{(i)}(t) \equiv 0$, $i = \overline{1, 5}$, то на технологические параметр процесса наложены жесткие условия.

Левые части (22) конечно-разностных аналогов уравнений представляют собой градиенты аппроксимированного функционала качества (11). Следовательно, для решения задачи может быть применен градиентный метод.

Метод решения задачи оптимального управления заключается в следующем:

1. Задаются начальные приближения управления $v_i^0(t)$, $i = \overline{1, 5}$.

2. Если $v_i^n(t)$ известны, из системы уравнений (7) и начальных и граничных условий (8) находятся $\rho^{(n)}(l, t)$, $x^{(n)}(l, t)$, $u^{(n)}(l, t)$, $T_n^{(n)}(l, t)$, $T_c^{(n)}(l, t)$ и из сопряженной задачи (16)-(22) находятся $\xi_i^{(n)}(l, t)$, $\lambda_i^{(n)}(l, t)$, $i = \overline{1, 5}$.

3. Далее полагаем $v_i^{(n+1)} = v_i^n - \tau L_i$, $n = 0, 1, 2, \dots$, $i = \overline{1, 5}$.

4. Предельные значения управлений дают решение задачи оптимального управления.

Библиографические ссылки

1. Варшавский Г. А. Горение капли жидкого топлива (диффузионная теория) // Бюро новой техники НКАП. М. : Гостехиздат, 1945. № 6. С. 87–106.
2. Демиденко Н. Д. Моделирование статических и динамических режимов в трубчатых печах // Управление, вычислительная техника и информатика // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 3 (20). С. 13–21.
3. Демиденко Н. Д., Потапов В. И., Шокин Ю. И. Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами. Новосибирск : Наука. 2006. 551 с.
4. Демиденко Н. Д., Еркаева Е. А., Школьников И. Р. Разработка методов и программ расчета статических и динамических характеристик технологических печей. Красноярск : Вычислительный центр СО РАН СССР. 1986. 23 с.

References

1. Warshawskiy G. A. *Byuro novoy tekhniki NKAP*. Moscow, Gostekhizdat, 1945, № 6, p. 87–106.
2. Demidenko N. D. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012, 3 (20), p. 13–21.
3. Demidenko N. D., Potapov V. I., Shokin Y. I. *Modelirovaniye i optimizatsiya sistem s raspredelennymi parametrami* (Simulation and optimization of distributed parameter systems). Novosibirsk, Nauka, 2006, 551 p.
4. Demidenko N. D., Erkeyeva E. A., Shkol'nikova I. R. *Razrabotka metodov i programm rascheta staticheskikh i dinamicheskikh kharakteristik tekhnologicheskikh pechey* (Development of methods and programs for calculation of static and dynamic characteristics of process furnaces). Krasnoyarsk, Vychislitel'nyy tsentr SO RAN SSSR, 1986, 23 p.

© Демиденко Н. Д., 2013

УДК 62.52

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ**

Н. Д. Демиденко, М. И. Альсов

СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН

Россия, 660049, Красноярск, просп. Мира, 53. E-mail: mkfs@rambler.ru

В статье предлагаются математические модели для стационарных и динамических процессов технологических печей как объектов с распределенными параметрами.

Эта математическая модель получена на основе законов сохранения энергии, массы и импульса и включает в себя дифференциальные уравнения в частных производных.

Проведено численное исследование стационарных режимов трубчатых печей. Для этого сформулирована краевая задача для расчета концентрации горючего вещества, плотности, скорости, температуры дымовых газов и температуры нагреваемого сырья, идущего на разделение в ректификационную колонну. Представлены результаты расчета технологических параметров. Предложенный метод может быть использован при автоматизации ректификационных установок в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

Ключевые слова: математическое моделирование, системы с распределенными параметрами, теплообмен.

NUMERICAL RESEARCH OF STATIONARY MODES IN TECHNOLOGICAL FURNACES

N. D. Demidenko, M. I. Alsov

SDTB «Nauka» KSC of the SB RAS

53 Mira prosp., Krasnoyarsk, 660049, Russia. E-mail: mkfs@rambler.ru

In the article we propose the mathematical models for stationary and dynamic processes of the technological furnaces as objects with distributed parameters.

This mathematical model is based on the laws of conservation of energy, mass and impulse and includes differential equations in private derivatives.

Computational investigation of the stationary modes of tubular furnaces is conducted. For this purpose the boundary-value problem is formulated for calculation of concentration of the combustible substance, density, speed, temperature of the flue gas and temperature of the heated raw materials going for separation to the rectificative column. The results of the calculation of the technological parameters are presented. The proposed method can be used at automation rectificative plant in petroleum-refining and petrochemical industry.

Keywords: mathematical modeling, distributed parameter systems, heat mass exchange.

Для высокотемпературного нагрева нефти и нефтепродуктов в процессе их переработки в ректификационных установках применяют трубчатые печи. Печи работают следующим образом [1]. Мазут и газ сжигаются в горелках, расположенных в камере радиации. Продукты сгорания из камеры радиации поступают в камеру конвекции, затем направляются в газосборник и по дымовой трубе уходят в атмосферу. В камере конвекции расположены конвекционные трубы, воспринимающие тепло при соприкосновении дымовых газов с поверхностью нагрева путем конвекции. Нагреваемый продукт в печи последовательно проходит через конвекционные и радиантные трубы, поглощая тепло. Радиантная поверхность воспринимает большую часть тепла, выделяемого при сгорании топлива (рис. 1)

Горение жидкого топлива всегда протекает в паровой фазе, причем испарение обеспечивается подводом тепла из зоны горения паров. Топливо всегда сжига-

ется в распыленном виде. Крайним случаем горения капля является диффузионное горение, когда скорость сгорания паров очень велика по отношению к скорости диффузии паров и окислителя в зоне горения, толщина которой становится исчезающе малой. К такому режиму может приближаться горение сравнительно круглых капель. Диффузионная теория горения развита Г. А. Варшавским [2].

В математических методах анализа процесса горения имеются некоторые расхождения у разных авторов, но для стационарного сферического горения используется единый подход. В целях упрощения, анализ проводится при следующих предположениях [3; 4]:

1. Жидкая капля имеет сферическую форму.
2. Влиянием конвекции пренебрегают, пламя рассматривают как сферическую поверхность, concentricкую с каплей.
3. Пламя считают разновидностью диффузионного пламени, которое образуется в результате реакции

между парами горючего и воздухом, которые реагируют в стехиометрическом соотношении.

4. Рассматривают стационарное состояние при постоянном диаметре капли, хотя реально диаметр жидкой капли уменьшается по мере горения, однако это изменение происходит медленно по сравнению с изменением скорости диффузии и прочими факторами.

5. Температура капли одинакова по всему объему.

6. Давление в течение всего процесса горения считается постоянным.

7. Влияние излучения рассматривают отдельно.

Исходя из законов механики сплошных сред, можно получить следующие уравнения нестационарного горения.

Динамическая модель [3]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial l} - \rho \frac{\partial u}{\partial l}, \\ \frac{\partial x}{\partial t} = -u \frac{\partial x}{\partial l} - \frac{x}{\tau}, \\ \frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial l} - R \frac{\partial T_n}{\partial l} - \frac{RT_n}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial l}, \\ \frac{\partial T_n}{\partial t} = (1-\gamma) T_n \frac{\partial u}{\partial l} - u \frac{\partial T_n}{\partial l} + \frac{xq}{c_v \tau} - \frac{Q(T_n)}{c_v \rho} + \\ + K_1 (T_c^1 - T_n) + K_1 (T_c^2 - T_n), \\ \frac{\partial T_c^1}{\partial t} = w \frac{\partial T_c^1}{\partial l} + K_2 (T_n - T_c^1) - Q(T_n, T_c^1), \\ \frac{\partial T_c^2}{\partial t} = -w \frac{\partial T_c^2}{\partial l} + K_2 (T_n - T_c^2) - Q(T_n, T_c^2). \end{array} \right.$$

где $x(l, t)$ – концентрация горючего вещества, $\rho(l, t)$, $u(l, t)$, $T_n(l, t)$ – плотность, скорость и температура дымовых газов; $T_c^1(l, t)$, $T_c^2(l, t)$ – температура нисходящего и восходящего потоков нагреваемого сырья; t, l – временная и пространственная координаты.

Начальные условия

$$\begin{aligned} \rho(l, 0) &= \rho_0, x(l, 0) = x_0, \\ u(l, 0) &= u_0, T_n(l, 0) = T_{n0}, \\ T_c^1(l, 0) &= T_{c0}^1, T_c^2(l, 0) = T_{c0}^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Граничные условия

$$\begin{aligned} \rho(0, t) &= \alpha_1, x(0, t) = \alpha_2, \\ u(0, t) &= \alpha_3, T_n(0, t) = \alpha_4, \\ T_c^1(L, t) &= \alpha_5, T_c^2(0, t) = T_c^1(0, t). \end{aligned} \quad (3)$$

Стационарную модель, исследуем более подробно которая следует из (1):

$$\begin{aligned} -u \frac{\partial \rho}{\partial l} - \rho \frac{\partial u}{\partial l} &= 0, \\ -u \frac{\partial x}{\partial l} - \frac{x}{\tau} &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -u \frac{\partial u}{\partial l} - R \frac{\partial T_n}{\partial l} - \frac{RT_n}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial l} &= 0, \\ (1-\gamma) T_n \frac{\partial u}{\partial l} - u \frac{\partial T_n}{\partial l} + \frac{x}{c_v \tau} q - \frac{Q(T_n)}{c_v \rho} + \\ + K_1 (T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) &= 0, \\ w \frac{\partial T_c^1}{\partial l} + K_2 (T_n - T_c^1) - Q(T_n, T_c^1) &= 0, \\ -w \frac{\partial T_c^2}{\partial l} + K_2 (T_n - T_c^2) - Q(T_n, T_c^2) &= 0 \end{aligned}$$

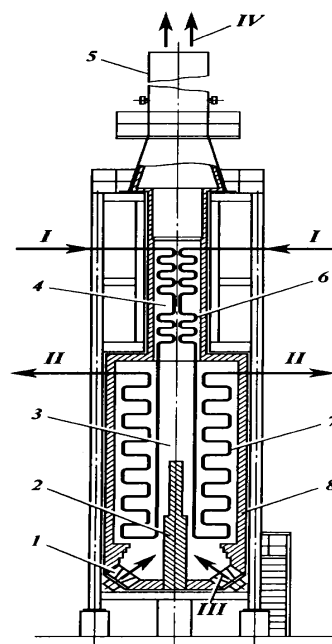


Рис. 1. Схема трубчатой печи:

1 – горелка; 2 – настильная стенка; 3 – камера радиации (топочная камера); 4 – камера конвекции; 5 – дымовая труба; 6 – змеевик конвекционных труб; 7 – змеевик радиантных труб; 8 – футеровка. Потоки I – вход сырья; II – выход сырья; III – топливо и воздух; IV – дымовые газы

Второе, четвертое, пятое и шестое уравнения содержат пространственные производные только одной неизвестной функции.

Приведем первое, третье и четвертое уравнения к виду, содержащему аналогично производную только от одной искомой функции dp/dt , du/dl и dT_n/dl . Для этого применим теорию о неявных функциях к системе

$$\begin{aligned} u \frac{\partial \rho}{\partial l} + \rho \frac{\partial u}{\partial l} &= 0, \\ u \frac{\partial u}{\partial l} + R \frac{\partial T_n}{\partial l} + \frac{RT_n}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial l} &= 0, \\ (1-\gamma) T_n \frac{\partial u}{\partial l} - u \frac{\partial T_n}{\partial l} &= -\frac{x}{c_v \tau} q + \frac{Q(T_n)}{c_v \rho} - \\ - K_1 (T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) &= \varphi. \end{aligned} \quad (5)$$

В этом случае

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \frac{\partial T_n}{\partial l} = \frac{\Delta_3}{\Delta}. \quad (6)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} u & \rho & 0 \\ \frac{RT_n}{\rho} & u & R \\ 0 & (1-\gamma)T_n & -u \end{vmatrix} =$$

$$= -u^3 + u\rho \frac{RT_n}{\rho} - uR(1-\gamma)T_n =$$

$$= -u^3 + \gamma RuT_n = u(\gamma RT_n - u^2),$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & \rho & 0 \\ 0 & u & R \\ \varphi & (1-\gamma)T_n & -u \end{vmatrix} = R\rho\varphi, \quad (7)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} u & 0 & 0 \\ \frac{RT_n}{\rho} & 0 & R \\ 0 & \varphi & -u \end{vmatrix} = -Ru\varphi, \quad (8)$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} u & \rho & 0 \\ \frac{RT_n}{\rho} & u & 0 \\ 0 & (1-\gamma)T_n & \varphi \end{vmatrix} = u^2\varphi. \quad (9)$$

Таким образом, будем иметь:

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{R\rho\varphi}{u(\gamma RT_n - u^2)},$$

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = -\frac{Ru\varphi}{u(\gamma RT_n - u^2)} = -\frac{R\varphi}{\gamma RT_n - u^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial l} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{u^2\varphi}{u(\gamma RT_n - u^2)} = \frac{u\varphi}{\gamma RT_n - u^2}.$$

Тем самым система (4) приведена к следующему виду:

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} = \frac{R\rho \left(-\frac{x}{c_v\tau}q + \frac{Q(T_n)}{c_v\rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{u(\gamma RT_n - u^2)}$$

$$\frac{\partial x}{\partial l} = -u \frac{x}{\tau}$$

$$\frac{\partial T_n}{\partial l} = \frac{u \left(-\frac{x}{c_v\tau}q + \frac{Q(T_n)}{c_v\rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{\gamma RT_n - u^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial l} = \frac{-R \left(-\frac{x}{c_v\tau}q + \frac{Q(T_n)}{c_v\rho} - K_1(T_c^1 + T_c^2 - 2T_n) \right)}{\gamma RT_n - u^2}$$

$$\frac{\partial T_c^1}{\partial l} = \frac{K_2}{w}(T_n - T_c^1) - \frac{1}{w}Q(T_n, T_c^1),$$

$$\frac{\partial T_c^2}{\partial l} = -\frac{K_2}{w}(T_n - T_c^2) - \frac{1}{w}Q(T_n, T_c^2), \quad (11)$$

$$\rho(0) = \alpha_1, \quad x(0) = \alpha_2, \quad u(0) = \alpha_3, \quad T_n(0) = \alpha_4, \quad (12)$$

$$T_c^1(L) = \alpha_5, \quad T_c^2(L) = T_c^1(0) = \alpha_6.$$

На рис. 2–5 приведены результаты расчетов стационарных режимов при различных начальных условиях для плотности $\rho(l)$, концентрации $x(l)$, скорости температуры $u(l)$, температуры дымовых газов $T_n(l)$, и нагреваемого сырья $T_c^1(l)$. При этом за начальные условия приняты $\rho(0) = 720 \text{ кг/м}^3$, $x(0) = 0.47$, $u(0) = 5 \text{ м/с}$, $T_n(0) = 450 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c(0) = 270 \text{ }^\circ\text{C}$. Затем начальные данные изменялись с шагом $\pm 5 \%$ при постоянных значениях остальных параметров.

Предлагаемый метод анализа стационарных режимов технологических печей позволяет еще на стадии проектирования ректификационных установок обеспечить высокое качество разделения многокомпонентных смесей в нефтепереработке и нефтехимии.

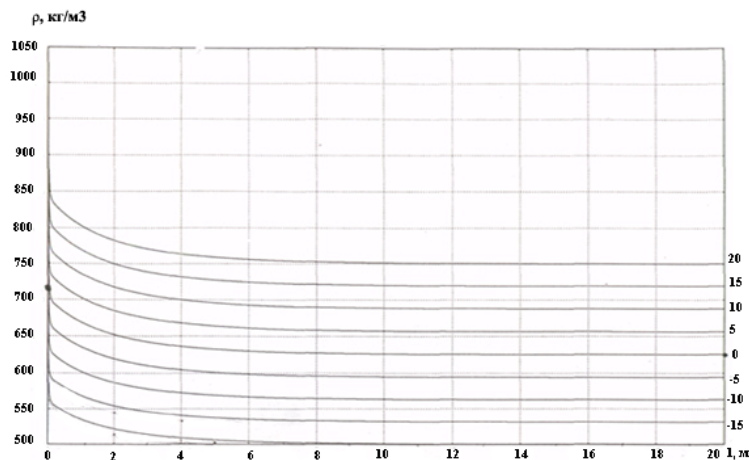


Рис. 2. Графики распределения плотности дымовых газов по длине объекта

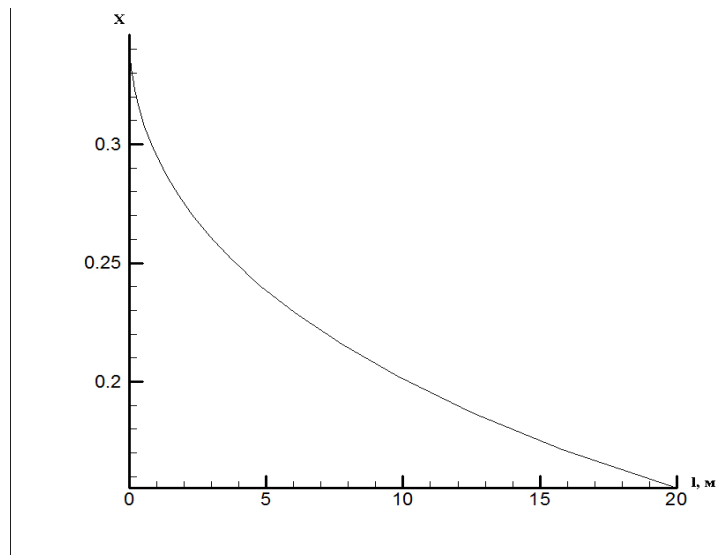


Рис. 3. Графики изменения концентрации по длине объекта

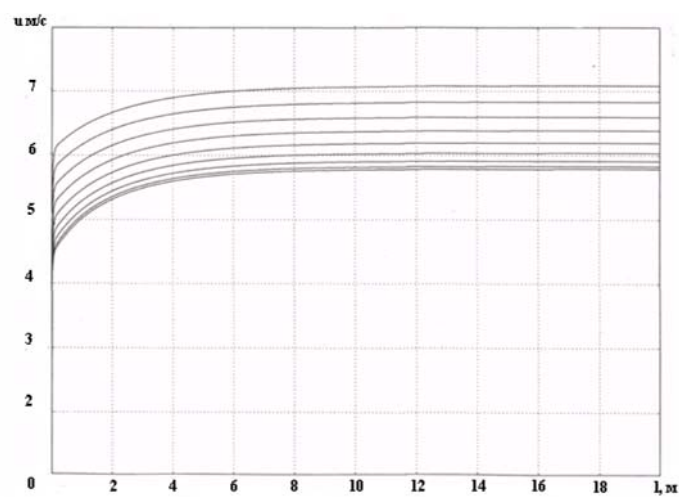


Рис. 4. Графики изменения скорости дымовых газов по длине объекта

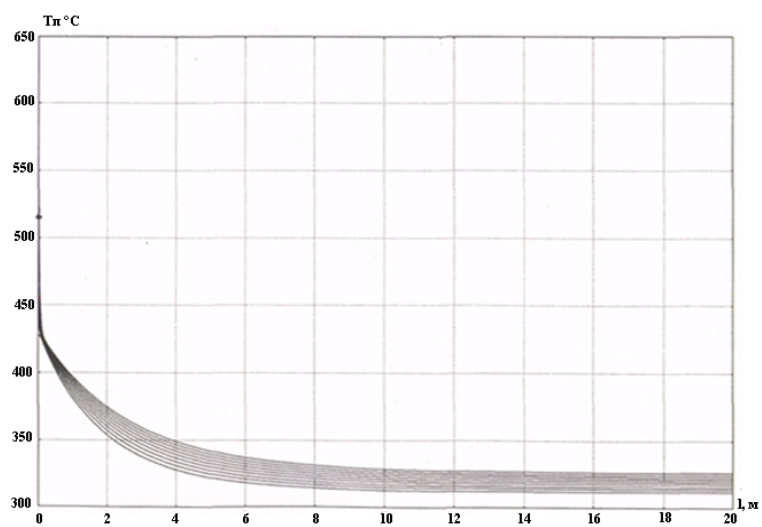


Рис. 5. Графики изменения температуры дымовых газов по длине объекта

Библиографические ссылки

1. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А. Щелкунов. М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 677 с.
2. Варшавский Г. А. Горение капли жидкого топлива (диффузионная теория) // Бюро новой техники НКАП. М. : Гостехиздат, 1945. № 6. С. 87–106.
3. Демиденко Н. Д. Моделирование статических и динамических режимов в трубчатых печах // Вестник Томского государственного университета. Управление вычислительная техника и информатика. 2012. № 3 (20). С. 13–21.
4. Демиденко Н. Д., Кулагин В. А., Шокин Ю. И. Моделирование и вычислительные технологии рас-

пределенных систем. Новосибирск : Наука. 2012. 424 с.

References

1. Skoblo A. I., Molokanov Y. K., Vladimirov A. I., Shchelkunov V. A. *Processes and devices of oil and gas refining and petrochemistry*. Moscow, ООО "Nedra-Biznesstsentr", 2000, 677 p.
2. Warsaw G. A. *Byuro novoy tekhniki NKAP*. Moscow, Gostekhizdat, 1945, no. 6, p. 87–106.
3. Demidenko N. D. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 3 (20), p. 13–21.
4. Demidenko N. D. *Modelirovaniye i vychislitel'nyye tekhnologii raspredelennykh sistem* (Modeling and computing technologies of distributed systems). Novosibirsk, Nauka, 2012, 424 p.

© Демиденко Н. Д., Альсов М. И., 2013

УДК 681.828

ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ЛЕТАЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

В. В. Ильиных, А. В. Ключников, А. В. Лысых, Е. Ф. Михайлов, А. Г. Тимошенко

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина
Россия, Снежинск, ул. Васильева, 13, а. я. 245. E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

Обсужден вопрос о повышении точности контроля параметров массо-инерционной асимметрии высокоскоростных осесимметричных летательных объектов с использованием балансировочного оборудования. Представлены конструкция и принцип действия балансировочного стенда с газовыми опорами, структурная схема измерительной системы. Эффективность предложенной технологии балансировки опробована и осуществлена с положительными результатами на вновь спроектированном динамическом балансировочном стенде. Результаты могут быть полезны исследователям при проектировании подобных измерительных систем на основе средств балансировочной техники и их практическом применении.

Ключевые слова: летающая модель, центр масс, ось инерции, балансировочный стенд, измерительная система, ротор.

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF QUALITY DURING THE MANUFACTURE OF HYPERSONIC UNCONTROLLABLE FLYING MODELS

V. V. Ilinykh, A. V. Klyuchnikov, E. F. Mihailov, A. G. Timoshchenko

Russian Federal Nuclear Centre – All-Russia Research Institute of Technical Physics
named after academician E. I. Zababakhin
P. b. 245, 13 Vassilyeva str., Snezhinsk, 456770, Russia. E-mail: a.klyuchnikov@bk.ru

The article considers the question of increase of precision testing of high speed axisymmetric flying objects mass-inertia parameters with the use of counterbalancing equipment. The construction and operating principle of the balancing stand with the gas bearings and a block diagram of measuring system are presented. The effectiveness of the proposed balancing technology is tested and carried out with the newly designed dynamic balancing stand. The results may be useful for research workers in the process of design of the similar measuring systems based on the means of balancing equipment and in the process of their practical employment.

Keywords: flying model, mass centre, axis of inertia, balancing stand, measuring system, rotor.

В работах [1; 2] отмечается, что снижение динамической устойчивости неуправляемой высокоскоростной летающей модели (ЛМ), представляющей собой тело вращения, например, возникающее под действи-

ем массо-инерционной асимметрии, может привести к появлению различных аномалий при движении модели в атмосфере. В частности, возрастают уровни вибрации, а также могут быть реализованы такие анома-

лии как, значительное (в десятки и сотни раз) увеличение угла атаки по сравнению со статическими балансировочными значениями, останов вращения в плоскости угла атаки и ориентация на набегающий поток воздуха одной стороной (так называемое «лунное» движение модели), обнуление и последующей реверс угловой скорости крена и др. Реализация аномальных режимов полета приводит к существенным отклонениям модели от расчетной траектории и снижению скорости движения таких моделей по сравнению с расчетной, к значительному повышению уровня боковых перегрузок, неравномерному нагреву поверхности, к сбоям и отказам в работе бортовых приборов и систем, появлению дополнительной погрешности в работе датчиковой аппаратуры. Таким образом, одним из условий обеспечения высокой эффективности ЛМ, в частности, стабилизируемой вращением вокруг своей геометрической оси (определяемой как ось симметрии наружной поверхности и обычно принимаемой в качестве строительной), ее движения с заданной точностью по расчетной траектории и надежного функционирования приборов и систем становится обеспечение ее качественной статической и моментной сбалансированности на завершающем этапе общей сборки. Это, в свою очередь, обеспечивает если не полное устранение массо-инерционной асимметрии, то, по крайней мере, ее уменьшение до допустимой величины по критерию влияния последствий возможной динамической неустойчивости на летно-технические характеристики модели. А по наличию и значениям остаточных (после проведения процедуры балансировки) параметров массо-инерционной асимметрии, т. е. параметров, характеризующих асимметричность в распределении масс относительно геометрической оси, можно судить о качестве изготовления ЛМ.

К числу указанных параметров массо-инерционной асимметрии, оказывающих существенное (в ряде случаев – вплоть до катастрофического) влияние на летно-технические характеристики ЛМ, относится величина поперечного смещения центра масс с геометрической оси и углы перекаса осей главного эллипсоида инерции относительно связанной системы координат, в частности, – угол перекаса продольной главной центральной оси инерции (ГЦОИ) относительно геометрической оси [1]. Появление массо-инерционной асимметрии обусловлено неизбежными случайными отклонениями характеристик элементов конструкции (масса, моменты инерции, координаты установки). Это, учитывая невысокую точность теоретического расчета указанных параметров [1–3], который, как правило, проводится на этапе проектирования, делает актуальной задачу их определения и последующего приведения к значениям, не превышающим заданных предельно-допустимых значений, путем корректировки массы ЛМ после изготовления и сборки модели. Главным образом это касается единичного производства уникальных ЛМ, прогнозирование инерционных характеристик которых расчетным путем может иметь погрешности, значительно превышающие заданные допуски. Наиболее досто-

верным способом определения указанных параметров массо-инерционной асимметрии является их измерение. Измерение параметров выполняют с использованием косвенных методов измерений, по специальным методикам, по результатам определения массово-центровочных и инерционных характеристик (МЦИХ) – массы, координат центра масс, моментов инерции ЛМ, – для чего применяют специализированное контрольно-измерительное оборудование, учитывающее характерные конструктивные особенности (форма корпуса, отсутствие удобных базовых поверхностей для установки в измерительное устройство и т. п.) контролируемых объектов. И только для определения массы ЛМ обычно используют стандартные, например, платформенные весы, обладающие требуемой точностью измерений. Необходимую корректировку массы модели, как правило, выполняют с помощью балансировочных грузов, прикрепляемых к штатной плоскости коррекции дисбалансов модели.

В настоящее время для измерения координат центра масс в основном используются так называемые центровочные контрольно-измерительные стенды, реализующие весовой метод измерений. Для измерений моментов инерции широко применяются методы физического маятника, унифиляра, бифиляра, полифиляра, машины Атвуда [3; 4]. Наибольшее применение для этих целей получили контрольно-измерительные стенды, реализующие метод перевернутого унифилярного маятника, обеспечивающие удобный доступ и контролируемому объекту, закрепляемому в технологической оснастке на измерительном столе стенда. Однако стендовое оборудование обоих типов, используемое для проведения контрольных операций, характеризуется сравнительно низкой точностью определения параметров массо-инерционной асимметрии. Однако точность лучших образцов такого оборудования не превышает 0,05–0,1 мм при определении координат центра масс и 4–6 угловых минут при определении угла перекаса продольной ГЦОИ (следовательно, допуск на координату центра масс и на угол перекаса продольной ГЦОИ относительно геометрической оси объекта, для контроля которых могут быть использованы такие стенды, должны быть около 0,5 мм и 40 угловых минут соответственно. В то же время с развитием техники наблюдается увеличение требований к точности изготовления и балансировки высокоскоростных ЛМ. Сегодня требования к обеспечению указанных параметров моделей в несколько раз жестче, что также приводит к соответствующему возрастанию требований к инструментальной точности оборудования, используемого для определения параметров – до значений 0,01 мм и 1 угловой минуты при определении поперечных смещений центра масс и перекасов продольной ГЦОИ соответственно. Симметричность формы, как правило, придаваемой ЛМ при проектировании, конструировании и изготовлении для обеспечения совпадения оси массовой симметрии и геометрической оси, обуславливает близость к нулю номинальных значений контролируемых параметров массо-инерционной асимметрии модели. В свою оче-

редь это обстоятельство определяет специфику и трудности процесса их измерений по сравнению с контролем всех других МЦИХ, в частности, требует для повышения точности, например, известным методом многократных измерений, увеличения числа измерений с последующим усреднением искомых параметров. Однако низкая производительность и высокая трудоемкость обоих типов перечисленного контрольно-измерительного оборудования и необходимость многократной переустановки объекта контроля на стендах (нередко работы по балансировке лишь одной МЛ на них могут продолжаться до нескольких суток), сложность обеспечения неизменных условий в течение всего балансировочного эксперимента препятствует повышению точности измерений.

Применение методов динамической балансировки, позволяющей с высокой точностью совместить геометрическую ось контролируемого объекта с осью вращения, имеющейся на балансировочном станке (стенде), позволяет измерить характеристики асимметрии масс непосредственно относительно этой оси с точностью, в 5–10 раз превышающей точность измерений тех же характеристик на устройствах, реализующих методы статической балансировки [3]. При этом проведение работ по балансировке сложных тел вращения (к числу которых вполне можно отнести ЛМ), когда деформации от вращения вносят существенные погрешности, или если внутренние элементы конструкции могут сместиться при вращении с высокими скоростями, а на корпусе отсутствуют удобные базовые поверхности для установки на стандартные опоры балансировочного станка, требует применения специфической технологической оснастки и низких (зачастую не превышающих 1–2 Гц) рабочих частот вращения, что не позволяет применять серийно выпускаемые станки, диапазоны рабочих частот которых, как правило, начинаются от 6–10 Гц, а также требует вертикального расположения оси вращения, исключающего прогибы модуля под действием силы тяжести.

Для прецизионного определения параметров массо-инерционной асимметрии скоростных конических ЛМ методом низкочастотной балансировки спроектирована и изготовлена автоматизированная система контроля, построенная на базе вертикального дорезонансного динамического балансировочного стенда с жесткими газовыми опорами, выполненными в виде соосных конических газостатических подшипников, и средств вычислительной техники.

Конструктивная схема балансировочного стенда приведена на рис. 1. Стенд содержит две – верхнюю и нижнюю – консольно закрепленные на вертикальной стойке идентичные по конструкции колебательные подвески, каждая из которых выполнена в виде пары упругих плоскопараллельных пластин с общим массивным основанием, удерживающих соответственно верхний или нижний газостатические подшипники. С верхним подшипником совмещен пневматический механизм раскрутки, а с нижним – пневматический механизм торможения вращающегося в опорах объекта. Вертикальная стойка закреплена на мощном фундаменте.

В упругих элементах опор, с поджатием, выполняемым с помощью винтов, размещаются пьезоэлектрические датчики силы генераторного типа.

Стенд снабжен жестким максимально сбалансированным технологическим переходником, имеющим форму усеченного конуса и выполненным в виде тонкостенного металлического кожуха, наружная боковая поверхность которого соответствует рабочим поверхностям газостатических подшипников. При этом поверхности внутренних опор переходника соответствуют базовым посадочным поверхностям контролируемой ЛМ. На внутренние опоры переходника ЛМ устанавливается торцом вверх в соответствии с рис. 2 и фиксируется с использованием трех фиксирующих шпилек (не показаны), равномерно расположенных по окружности на крышке (не показана), образуя тем самым так называемый сборный ротор.

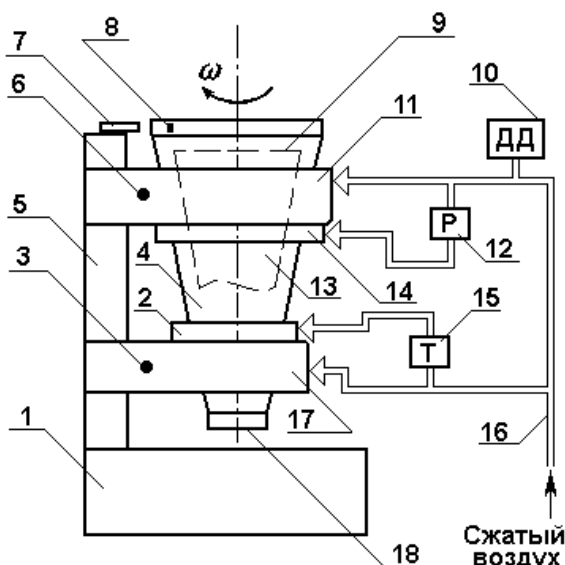


Рис. 1. Схема вертикального балансировочного стенда: 1 – фундамент; 2 – пневматический механизм торможения; 3 – нижний датчик силы; 4 – технологический переходник; 5 – вертикальная стойка; 6 – верхний датчик силы; 7 – световодный жгут фотодатчика; 8 – светоотражающее зеркало; 9 – верхняя (первая) плоскость коррекции; 10 – верхняя колебательная подвеска; 11, 17 – напорные трубопроводы пневмораспределительной системы; 12 – электropневмораспределитель «Разгон»; 13 – объект контроля; 14 – пневматический механизм разгона; 15 – электropневмораспределитель «Тормоз»; 16 – нижняя колебательная подвеска; 18 – нижняя (вторая) плоскость коррекции

Применение переходника, исключает возможность механического контакта контролируемой модели с балансировочным оборудованием в процессе выполнения измерений, а также материализует вторую (нижнюю) плоскость коррекции, что необходимо для настройки измерительной системы стенда. При этом в процессе настройки системы в качестве первой (верхней) плоскости коррекции используется штатная плоскость коррекции ЛМ.

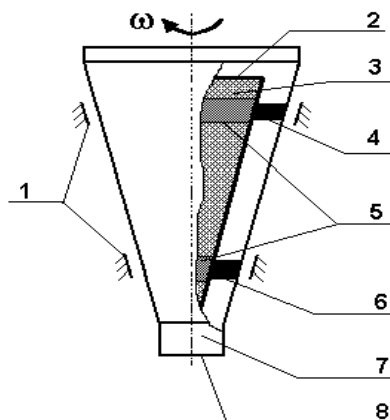


Рис. 2. Схема размещения ЛМ внутри технологического переходника в составе сборного ротора:

1 – газостатический подшипник; 2 – верхняя (штатная) плоскость коррекции; 3 – объект контроля; 4 – верхняя внутренняя опора; 5 – базовые поверхности ЛМ; 6 – нижняя внутренняя опора; 7 – технологический переходник; 8 – нижняя плоскость коррекции

В качестве рабочего тела используется сжатый воздух, поступающий из заводской пневмосети под давлением не менее 0,6 МПа. В ходе балансировочного эксперимента сжатый воздух посредством трубопроводов пневмораспределительной сети (ПРС) через кольцевые щелевые питатели, имеющиеся в каждом газостатическом подшипнике, поступает (непрерывно) в зазор между сопрягаемыми поверхностями обоих подшипников и технологического переходника, а также (через посредство электропневмораспределителей) подается в пневматические механизмы разгона и торможения, обеспечивая раскрутку и останов сборного ротора.

Для подготовки сжатого воздуха каждый из четырех воздуховодных каналов ПРС оснащена устройством, обеспечивающим очистку сжатого воздуха, поступающего в газостатические подшипники и пневматические механизмы балансировочного стенда, как от твердых и субмикронных твердых частиц, так и от масла, а также обеспечивает удаление конденсата. В результате поддува воздуха сборный ротор, загруженный на стенд, занимает центральное положение, совмещая ось симметрии наружной поверхности технологического переходника с осью вращения. В ходе балансировочного эксперимента совмещение геометрической оси контролируемой ЛМ с осью вращения обеспечивается методически, по результатам измерений дисбалансов сборного ротора для двух диамет-

рально противоположных фиксированных положений модели внутри технологического переходника.

Измерение давления сжатого воздуха, поступающего на вход ПРС, осуществляется с помощью аналогового датчика давления. Датчик также обеспечивает контроль аварийного уровня давления сжатого воздуха.

Оптоволоконный фотодатчик предназначен для контроля частоты вращения сборного ротора. Также фотодатчик используется для определения фазы дисбалансов. При этом светоотражающее зеркало фотодатчика закрепляют на цилиндрической части боковой поверхности технологического переходника и не изменяют в течение всего балансировочного эксперимента. Фотодатчик формирует световой пучок, направляемый по световодному жгуту к переходнику, а также принимает свет, отраженный от светоотражающего зеркала, угловое положение которого однозначно связано с системой координат переходника и контролируемой модели. Фотодатчик срабатывает по окончании каждого полного оборота переходника вокруг своей оси в момент приема отраженного пучка света. Прохождение прямого и отраженного пучков света обеспечивает световодный жгут.

Для проведения работ по тестированию нормируемых метрологических характеристик системы контроля, выполняемых с определенной периодичностью, балансировочный стенд снабжен эталонными телами, представляющими собой габаритно-массовые макеты контролируемых ЛМ. Каждое эталонное тело обладает известными с высокой точностью массо-центровочными и инерционными характеристиками, а базовые посадочные поверхности тела соответствуют аналогичным поверхностям конкретного типа ЛМ.

Для индивидуальной настройки системы на конкретный объект контроля балансировочный стенд оснащен набором калиброванных пробных грузов.

Структурно-функциональная схема измерительной системы стенда приведена на рис. 3. Измерительно-вычислительным и управляющим ядром системы является персональный компьютер (ПК), оснащенный устройствами аналогового и цифрового ввода-вывода, которые выполнены в виде электронных модулей и установлены в свободные слоты шины расширения на материнской плате системного блока ПК. Имеющийся в составе устройства аналогового ввода таймер-счетчик для подсчета меток времени, генерируемых высокостабильным генератором и используется для определения частоты вращения сборного ротора.

Под управлением рабочей программы ПК обеспечивает в режиме реального времени опрос датчиков силы, контролирует частоту вращения ротора и давление сжатого воздуха на входе ПРС, формирует команды на включение и выключение электропневмораспределителей для разгона и торможения ротора, выполняет запуск процесса оцифровки и регистрации в оперативной памяти вибросигналов, поступающих от датчиков силы, при достижении ротором рабочей частоты вращения. Также ПК осуществляет обработку вибросигналов с применением процедуры Фурье-фильтрации, обеспечивая выделение с частотой, рав-

ной рабочей частоте вращения ротора, и определение амплитуд и фаз дискретных составляющих зарегистрированных вибросигналов, пропорциональных соответственно амплитудам и фазам вибраций опор (вызванных дисбалансами вращающегося в опорах ротора), выполняет математические расчеты, обеспечивает визуализацию эксперимента, выдает на печать протокол балансировки.

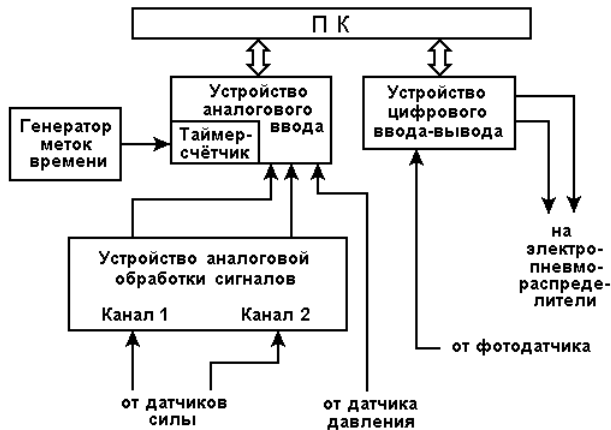


Рис. 3. Структурная схема измерительной системы

Контроль частоты вращения выполняется с использованием высокостабильного генератора временных меток и таймера-счетчика, имеющегося в составе устройства аналогового ввода. Таймер-счетчик работает в режиме непрерывного счета входных импульсов (меток времени), поступающих с выхода высокостабильного генератора. Фотодатчик непрерывно излучает свет, направленный по световоду к технологическому переходнику, и вырабатывает импульсный сигнал в момент получения отраженного от зеркала ответного пучка света. По сигналу от фотодатчика, вырабатываемому при завершении каждого полного оборота сборного ротора, ПК считывает содержимое таймера-счетчика, по приращению результата счета определяет количество меток времени, поступивших на вход счетчика с момента предыдущего считывания, и рассчитывает текущую частоту вращения сборного ротора.

Двухканальное устройство аналоговой обработки сигналов обеспечивает импедансное согласование выходов датчиков силы, низкочастотную аналоговую фильтрацию и усиление вибросигналов, поступающих для оцифровки на вход устройства аналогового ввода сигналов.

Испытуемая ЛМ балансируется на стенде в качестве отдельной детали, входящей в состав сборного ротора [5]. В процессе балансировочного эксперимента регистрацию всех вибросигналов, поступающих от датчиков силы и несущих в себе информацию о дисбалансах, выполняют на выбеге сборного ротора (после его предварительной раскрутки), при постоянном рабочем давлении сжатого воздуха, на постоянной рабочей частоте вращения. В процессе регистрации вибросигналов изменение частоты вращения не пре-

вышает ~0,5–0,6 % от рабочей частоты вращения. Малая скорость самопроизвольного торможения ротора обеспечивается применением газовой смазки, исключающей сухое трение в опоре.

Перед балансировкой на другом оборудовании и с использованием других средств измерений определяют массу M , продольное положение центра масс относительно штатной (верхней) и второй (нижней) плоскости коррекции, а также экваториальный I_y и аксиальный I_a моменты инерции ЛМ. Полученную информацию используют в качестве начальных данных для проведения последующих расчетов при определении контролируемых параметров массо-инерционной асимметрии модели.

В ходе эксперимента в каждом пуске сборного ротора определяют амплитуды и фазы дискретных составляющих вибросигналов, пропорциональных дисбалансам сборного ротора. Искомые параметры массо-инерционной асимметрии ЛМ определяют расчетным путем по результатам измерения в двух плоскостях коррекции значений и углов дисбалансов сборного ротора. Измерения выполняют сначала для сборного ротора в исходном состоянии, а затем – после установки в известных угловых положениях (последовательно в верхней и нижней плоскостях коррекции) пробных грузов известной массы. Измерения в исходном состоянии сборного ротора проводят дважды – для двух фиксированных угловых положений модели относительно переходника, отличающихся друг от друга на 180 градусов, с последующим исключением действия «паразитных» дисбалансов, обусловленных наличием технологического переходника в сборке, путем вычисления для каждой плоскости коррекции геометрической полуразности двух векторов дисбалансов сборного ротора [5]. Это обеспечивает совмещение оси симметрии наружной поверхности испытываемого модуля с осью симметрии наружной поверхности технологического переходника.

По результатам экспериментов с пробными грузами определяют коэффициенты балансировочной чувствительности системы к дисбалансам в каждой плоскости коррекции, а также коэффициенты взаимного влияния плоскостей коррекции. Полученные коэффициенты затем используют при расчете начальных значений и углов дисбалансов контролируемой ЛМ $\vec{D}_B$ и $\vec{D}_H$, действующих соответственно в верхней и нижней плоскостях коррекции. Далее рассчитывают начальные параметры радиуса-вектора поперечного смещения центра масс и вектора-угла перекоса продольной ГЦОИ модели относительно ее геометрической оси по формулам [3; 4]:

$$\vec{\rho} = \frac{\vec{D}_B + \vec{D}_H}{M};$$

$$\vec{\alpha}_{ГЛ} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2 \cdot (\vec{D}_B \cdot x_B - \vec{D}_H \cdot x_H)}{I_y - I_a},$$

где x_B и x_H – расстояния от центра масс модуля до соответственно верхней и нижней плоскости коррекции. Далее (в случае, если какой-либо из указанных

параметров массо-инерционной асимметрии превышает предельно-допустимое значение), рассчитывают массу и угловое положение балансировочного груза (грузов) для прикрепления к штатной плоскости коррекции модели с целью корректировки ее.

Рассмотренная технология балансировки и реализующая ее система, построенная на базе вертикального низкочастотного динамического балансировочного стенда с коническими газостатическими подшипниками, при номинальной частоте вращения 2 Гц обеспечивает возможность определения величины поперечного смещения центра масс и угла перекоса продольной ГЦОИ с погрешностями, не превышающими соответственно 0,01 мм в диапазоне измерений от 0,03 до 0,2 мм и 1 угловой минуты в диапазоне измерений от 1 до 10 угловых минут. Высокая точность измерений обеспечивается низкой частотой вращения, когда контролируемая ЛМ еще проявляет свойства жесткого ротора и деформации от вращения в опорах не вносят существенных погрешностей в результаты измерений, вертикальным расположением оси вращения, исключая прогибы корпуса под действием сил тяжести, использованием газовой смазки для разделения сопрягаемых рабочих поверхностей сборного ротора и опор, индивидуальной настройкой балансировочного стенда на контролируемую модель в ходе эксперимента [5]. Применение в системе пьезоэлектрических датчиков силы, не требующих питания, и фотоэлектрического датчика оборотов, а также применение пневматических приводов для раскрутки и торможения ротора обеспечивают взрывобезопасность применения стенда. Применение технологического переходника обеспечивает материализацию второй плоскости коррекции и сохранность внешних поверхностей балансируемых тел.

Результаты опытной эксплуатации подтвердили высокую производительность (время балансировочного эксперимента, как правило, не превышает 1,5–2 часов) и эффективность технологии прецизионного уравнивания в динамическом режиме тел вращения, обладающих единственной, расположенной на значительном расстоянии от центра масс тела, плоскостью коррекции. Разработка защищена патентами РФ 2292533, 2292534, 2434212, 2453818.

Сложность разработки такой системы делает оправданным ее внедрение для контроля таких уникальных объектов как высокоскоростные ЛМ, предъявляющих после их изготовления и сборки высокие

требования к точности и надежности экспериментального определения параметров массо-инерционной асимметрии, и обеспечивает снижение вероятности появления аномальных режимов полета и, соответственно, повышение эффективности использования высокоскоростных неуправляемых летающих моделей.

Библиографические ссылки

1. Правдин В. М., Шанин А. П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. 496 с.
2. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н., Богодистов С. С. Внешняя баллистика. М. : Машиностроение, 1991. 640 с.
3. Основы балансировочной техники. Т. 1. Уравновешивание жестких роторов и механизмов / под ред. В. А. Щепетильникова. М. : Машиностроение, 1975. 527 с.
4. Методы исследований на летающих моделях / под ред. А. Д. Миронова. М. : Машиностроение, 1988. 144 с.
5. Ключников А. В. Методика планирования эксперимента по определению величины поперечного смещения центра масс корпусов деталей методом динамической балансировки в условиях влияния значительной паразитной массы // Материалы XXXI Всерос. конф. по проблемам науки и технологий. Миасс, 2011. С. 163–166.

References

1. Pravdin V. M., Shanin A. P. *Ballistika neupravlyaemih letatel'nykh apparatov* (Ballistics of uncontrollable flying machines). Snezhinsk, RFNC-VNIITF, 1999. 496 p.
2. Dmitrievskiy A. A., Lisenko L. N., Bogodistov S. S. *Vneshnyaya ballistika* (External ballistics). Moscow, Mashinostroyeniye, 1991. 640 p.
3. Shchepetil'nikov V. A. *Osnovy balansirovochnoi tekhniki* (Fundamentals of balancing technique). Vol. 1. Moscow, Mashinostroyeniye, 1975, 527 p.
4. Mironov A. D. *Metody issledovaniy na letayushchih modelyakh* (Methods of researches on flying models). Moscow, Mashinostroyeniye, 1988, 144 p.
5. Klyuchnikov A. V. *Trudy 31 Vserossiyskoy konferentsii po problemam nauki i tekhnologii* (Proc. 31th All-Rus. Conf. for problems of science and technology). Miass, 2011, p. 163–166.

УДК 621.745.01:669.017

**ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА АЛЮМИНИЕВОЙ ПРУТКОВОЙ ЛИГАТУРЫ
НА ВЕЛИЧИНУ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИДА ТИТАНА**

Г. Г. Крушенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44. E-mail: genry@icm.krasn.ru

Металлоизделия машиностроительного профиля, изготавливаемые из заготовок, прошедших цикл плавления-кристаллизация, обладающие мелкокристаллической структурой, обладают и более высокими физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками по сравнению с изделиями с крупнокристаллической структурой. С целью измельчения структуры в процессе плавки в жидкий металл с помощью лигатур вводят добавки, которые измельчают структуру. К таким лигатурам, в частности, относится и прутковая алюминиево-титановая лигатура, содержащая частицы алюминидов титана, являющиеся центрами кристаллизации. Установлено, что нагрев прутка в процессе его введения в жидкий металл приводит к укрупнению частиц алюминидов титана, что снижает эффективность измельчения структуры. Поэтому в каждом отдельном случае необходимо оптимизировать скорость введения прутка в расплав.

Ключевые слова: алюминиево-титановая лигатура, частицы алюминидов титана, отливки из алюминиевых сплавов.

UDC 621.745.01:669.017

**THE EFFECT OF THE ALUMINUM MASTER ALLOY HEATING
ON THE SIZE OF TITANIUM ALUMINIDE PARTICLES**

G. G. Krushenko

Institute of Computational Modeling of the SB RAS
50, building 44 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: genry@icm.krasn.ru

The metal products of machine-building profile manufactured of billets passed through the cycle of melting-crystallization and having microcrystalline structure, demonstrate higher physical-mechanical properties and exploitation characteristics in comparison with the metal products of macro crystalline structure. During the process of melting the refining structure additives are introduced into liquid metal using master alloys for the aim of the structure refinement. In particular, the similar master alloy is the rod aluminum-titanium master alloy containing titanium aluminide particles which are the crystallization centers. It is determined, that the rod heating in the process of its introducing into the liquid metal leads to enlargement of the titanium aluminide particles, that decreases the efficiency of structure refinement. Therefore, in every particular case, it is necessary to optimize the velocity of rod introducing into liquid metal.

Keywords: aluminum-titanium master alloy, titanium aluminide particles, foundry goods of aluminum alloys

Using as an example information about known Al-Ti- and Al-Ti-B-containing aluminum master alloys [1] it has been shown that their quality has a strong influence on the quality of cast parts of aluminum alloys inoculated with these master alloys. One of the basic quality indices of master alloys is the size and distribution of the particles of inoculating compound.

It is well known that, the addition of a master alloy to molten aluminum results in fine equiaxed structure [2]. So it is known that fine equiaxed structure results in improving the mechanical properties. In addition, the grain size decreases due to the addition of grain refiner and the distribution of secondary phases and porosity is on finer scale and machinability is improved. The improved machinability of the material results in less machining time, longer tool life, lower maintenance costs and reduced machine tool.

In case of aluminum alloys, though there exists many new techniques of grain refinement still addition of grain refiners as nucleant (or inoculant) is the most common and preferred method for refining the grain structure [3]. Melt inoculation with titanium and or boron is the method predominantly used for refining the grain structure.

The inoculants Ti and or B are usually introduced in the form of an aluminum master alloy [4]. The morphological characteristics of titanium aluminide TiAl_3 particles in several Al-5Ti-1B (wt- %) master alloys in the form of rods have been investigated using a wide range of microscopical techniques. It has been found that both rough blocky and faceted blocky aluminides are present in such materials and that hexagonal platelets are entrained within these blocky aluminides. Auger spectroscopy and transmission electron diffraction have confirmed that the platelets are diborides. In previous work, it has been

suggested that duplex aluminides are particularly effective in promoting grain refinement during solidification. To investigate this, a master alloy containing duplex blocky aluminides was briefly remelted and recast from a range of temperatures. This resulted in the formation of significantly different aluminide types. When the original and remelted alloys were tested in commercial purity aluminum, using standard procedures, it was found that the presence of duplex aluminides does not, in itself, seem to be of great importance in influencing grain refiner efficiency.

This article presents an evaluation of the size and quantity of the particles of titanium aluminide $TiAl_3$ in rod inoculating alloying composition (master alloy) used in continuous casting of ingots of aluminum and aluminum-base alloys. These intermetallic particles in the aluminum master alloy are believed to act as heterogeneous nucleating sites during solidification aluminum and aluminum alloys resulting in grain refinement [5]

The master alloys containing 5,0 % and 3,5 % Ti (rods with a diameter of 9,5 and 8,0 mm, respectively) were investigated. The area titanium aluminide particles was determined by the method random intercepts [6] on specimens of cross sections of the rods (at 200 x) both in the original condition and after immersion of them and holding for 60 sec in molten aluminum (700 °C) with subsequent hardening in water with ice (0 °C). The rods were held in molten aluminum for the purpose of establishing the influence of thermal action on the size of the $TiAl_3$ particles in inoculation of the master alloy in the aluminum during casting of ingots. In this case the specimens were prepared on cross sections of the rods at a minimum distance from the boundary of fusion of them.

The analysis of the measurement results shows that in the original rod containing 5,0 % Ti the quantity of titanium aluminide particles with the smallest area (0 – 100 μm^2) is 20,43 %. Heating of the rod causes an increase in the quantity of particles of this size group by 3,6 times (to 74,19 %). A larger quantity of particles (29,04 %) corresponds to this range of sizes in the original rod of the master alloy with 3,5 % Ti than in the first master alloy but heating causes an increase in the quantity of them to a lesser degree (to 46,25 %). In this case it may be seen that the quantity of the finest aluminide particles in the master alloy with 5,0 % Ti is 1,6 times greater than with 3,5 % Ti. It was also established that heating of the rods leads to solution of the coarsest particles. For example, while in the alloy with 5,0 % Ti the largest area of a particle in original rod is 1285,92 μm^2 , heating causes a decrease in it by 3,1 times (to 411,84 μm^2) and in the rod of alloy with 3,5 % Ti by 1,3 times (from 1152,00 to 881,28 μm^2). The particles of titanium aluminide are less elongated in the alloy with 5,0 % Ti, which may be seen from an analysis of the

ratios of their length to width of their cross sections l/h . For example, while for the alloy with 5,0 % Ti after heating of the rod $l/h = 1:5$, for the alloy with 3,5 % Ti $l/h = 1:25$.

The difference in the dimensions of the titanium aluminide particles influenced the degree of refinement of the structure of 70 x 430 mm cross section ingot case by the semicontinuous aluminum casting with a withdrawal rate of 95...100 mm/min. The rods were immersed in the molten metal during flow of it along the runner from the mixer to the mold at a rate providing a titanium content 0,056...0,060 %. In rating the grain structure to GOST 210-73.4.275 on transverse templates of the ingots it was established that without inoculation the number of grains per mm^2 of specimen area is 4,4 in the peripheral zone, 28,1 in the intermediate, and 13,1 in the center. With inoculation of the molten material by master alloy with 5,0 % Ti the number of grains in these zones increases to 47,7; 74,9 and 51,6 per mm^2 respectively, while addition of the master alloy with 3,5 % Ti causes less of an effect of grain refinement, to 38,5; 73,9 and 35,5 per mm^2 .

Conclusions.

1. In heating of titanium-containing inoculating rods to the operating temperature by immersion of them in molten aluminum the size of titanium aluminide $TiAl_3$ particles increases, which decreases the inoculation effect.
2. The effect of refinement of the structure of the aluminum in casting of ingots is greater with the use of a rod master alloy with finer and less elongated compact titanium aluminide particles.

References

1. Mondal D. P., Jha N., Badkul A., Das S. Effect of Al-Ti-B master alloy addition on microstructure, wear and compressive deformation behaviour of aluminum alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, May 2012, vol. 22, issue 5, p. 1001–1011.
2. Murty B. S., Kori S. A., Chakraborty M. Grain refinement of aluminum and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying. *International Materials Reviews*, February 2002, vol. 47, № 1, p. 3–29.
3. Lee M. S., Grieveson P. Production of Al-Ti-B grain refining master alloys. *Materials Science and Technology*, June 2003, vol. 19, № 6, p. 769–772.
4. Mayes C. D., McCartney D. G., Tatlock G. J. Influence of microstructure on grain refining performance of Al-Ti-B master alloys. *Materials Science and Technology*, February 1993, vol. 9, № 2, p. 97–103.
5. Bondarev B. I., Napalkov V. I., Tararishkin V. I. *Modifizirovanie aluminievih deformiruemih splavov* (Inoculation of the wrought aluminium alloys). Moscow, Metallurgia, 1079, 224 p.
6. Wanner T., Fuller Jr. E. R., Saylor D. M. Homology metrics for microstructure response fields in polycrystals. *Acta Materialia*, January 2010, vol. 58, issue 1, p. 102–110.

УДК 544.18, 538.91

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА ПО ВАКАНСИОННОМУ МЕХАНИЗМУ В ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ГИДРИДЕ Mg_2NiH_4 *

А. А. Кузубов^{1,2,4}, Н. С. Елисеева^{1,2,4}, П. О. Краснов^{2,3,4}, А. В. Куклин^{1,4}, М. В. Сержантова⁴¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

²Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Россия, 660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50/38

³Сибирский государственный технологический университет

Россия, 660049, Красноярск, просп. Мира, 82

⁴Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: alex_xx@rambler.ru

Рассчитаны энергии образования вакансий в интерметаллическом гидриде Mg_2NiH_4 . Рассмотрен процесс диффузии водорода по вакансионному механизму в данном материале с целью оценки перспективности применения Mg_2Ni в качестве матрицы для хранения водорода. В ходе работы показано, что процесс наводороживания Mg_2Ni будет сопровождаться формированием пассивирующей пленки гидроксида, что обусловлено прочностью комплексов NiH_4 и высокими потенциальными барьерами перехода вакансии водорода между соседними никелями.

Ключевые слова: водородная энергетика, диффузия, Mg_2NiH_4 , вакансии, теория функционала плотности (DFT).

SIMULATION OF THE OF HYDROGEN DIFFUSION BY THE VACANCY MECHANISM IN THE INTERMETALLIC HYDRIDE Mg_2NiH_4

A. A. Kuzubov^{1,2,4}, N. S. Eliseeva^{1,2,4}, P. O. Krasnov^{2,3,4}, A. V. Kuklin^{1,4}, M. V. Serzhantova⁴¹Siberian Federal University,

79 Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia

²Kirenskiy Institute of Physics of the SB RAS

50, bld. 38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

³Siberian State Technologies University

82, Mira prosp., Krasnoyarsk, Russia

⁴Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: alex_xx@rambler.ru

In this report we calculate the energy of vacancy formation in the intermetallic hydride Mg_2NiH_4 . The vacancy mechanism of hydrogen diffusion in Mg_2NiH_4 was studied to estimate application possibility of Mg_2Ni as a promising matrix for the hydrogen storage. We established that hydrogenation process of Mg_2Ni is followed by formation of the passivating film of hydride, resulting from the NiH_4 complex structure integrity and high potential barriers diffusion of hydrogen vacancy between neighboring nickels.

Keywords: diffusion, hydrogen energy, Mg_2NiH_4 , vacancy, density functional theory (DFT).

Интерметаллические гидриды имеют подходящую для прикладного использования кинетику поглощения/выделения водорода в мягких условиях и поэтому в наибольшей мере подходят для создания систем хранения водорода [1; 2]. Однако практическое хранение водорода в таких связанных состояниях сталкивается с рядом сложностей.

Основные трудности, которые необходимо решить для этих материалов – это увеличение скорости процессов сорбции-десорбции водорода и повышение циклической устойчивости материала адсорбента. Для их преодоления требуются углубленные теоретиче-

ские и экспериментальные исследования в области физико-химических свойств интерметаллидов и гидридов на их основе.

Интерметаллиды на основе магния считаются наиболее перспективными материалами для хранения водорода за счет их высокой емкости, широкой распространенности магния в земной коре и его низкой стоимости по сравнению с альтернативными материалами [3]. Из всех сплавов на основе магния интерметаллическое соединение Mg_2Ni , обладающее гексагональной кристаллической решеткой, может быть легко синтезировано.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8194.

При этом оно быстро реагирует с водородом с образованием гидрида Mg_2NiH_4 , что делает его перспективным материалом для хранения водорода [4; 5].

В работе [6] с помощью DFT расчетов были определены наиболее выгодные положения для адсорбирования атомов водорода в объемном интерметаллиде Mg_2Ni . Исследование процесса диффузии одиночных атомов водорода в объеме Mg_2Ni показало, что потенциальные барьеры для миграции атома H очень малы, что свидетельствует о свободном его перемещении. Также наблюдалось, что уже в соединении $\text{Mg}_{126}\text{Ni}_{54}\text{H}_x$ ($x = 2-4$) водорода стремиться образовать тетраэдрический комплекс с никелем.

Согласно работе [7], после гидрирования Mg_2Ni претерпевает структурную перегруппировку, переходя в гидрид Mg_2NiH_4 . Под давлением 1 атм. этот гидрид переходит из высокотемпературной (ВТ) кубической фазы в низкотемпературную (НТ) моноклинную фазу, температура перехода составляет 518–483 К [8–10]. Ввиду того, что для практического применения адсорбентов водорода наиболее подходящим является материал, поглощающий водород при низком давлении и невысоких температурах, низкотемпературная фаза Mg_2NiH_4 привлекает большее внимание исследователей в области водород-аккумулирующих материалов [11–14]. Myers и др. [11] исследовали термодинамические, электронные и оптические свойства моноклинной НТ- Mg_2NiH_4 на основе ab-initio расчетов. Было установлено, что геометрия комплекса NiH_4 в НТ-фазе близка к правильному тетраэдру, что согласуется с данными нейтронной дифракции [15]. Были рассчитаны теплота образования Mg_2NiH_4 из H_2 и Mg_2Ni , а также энтальпия фазового перехода Mg_2NiH_4 из НТ в ВТ-фазу, хотя полученные значения оказались значительно выше экспериментальных. Haussermann и др. [12] исследовали структурную стабильность НТ- Mg_2NiH_4 и Ba_2PdH_4 , используя DFT расчеты. Разница в связывании водорода этими соединениями объясняется различием в силе взаимодействий групп $\text{Ni}(\text{Pd})\text{-H}$ и $\text{Mg}(\text{Ba})\text{-H}$. Авторами было предложено, что температура десорбции водорода из Mg_2NiH_4 может быть снижена путем введения дефектов (например, замена атома Mg на атом Al) вблизи тетраэдрического комплекса NiH_4 . Jasen и др. [13] также провели расчет электронной структуры НТ- Mg_2NiH_4 в рамках приближения локальной плотности (LDA). Ими был сделан вывод, что связь водорода с никелем сильнее, чем с магнием, и взаимодействие sp оболочек Ni с s-оболочкой водорода является основным в гидриде. На основании расчетов [14] теплоты реакции гидрирования, энтальпии образования и энергии, необходимой для отрыва атома водорода, был сделан вывод, что при гидрировании Mg_2Ni вероятность образования НТ-фазы Mg_2NiH_4 выше, чем ВТ-фазы. Также было установлено, что для удаления водорода при низких температурах из НТ- Mg_2NiH_4 обладающим высокой структурной стабильностью, необходим ввод в состав материала примесей-катализаторов, облегчающих кинетику процессов сорбции/десорбции. Вследствие высокой энергии связи водорода с никелем, еще одной проблемой, которая

может возникнуть при использовании гидрида Mg_2NiH_4 – скорость диффузии в нем атомов водорода. Поскольку в случае малой подвижности водорода гидрирование Mg_2Ni при нормальных условиях может приводить к образованию пассивирующей пленки. Таким образом, детальное изучение кинетики диффузии водорода внутри чистой фазы Mg_2NiH_4 позволит сделать заключение о целесообразности использования данного интерметаллида в качестве сорбента водорода.

Объекты и методы исследования. В настоящей работе исследования осуществлялись с помощью квантово-химического моделирования в лицензионном программном пакете VASP 5.3 (Vienna Ab-initio Simulation Package) [16–18] в рамках метода функционала плотности (DFT) [19–20] с использованием базиса плоских волн и PAW формализма [21–22]. Вычисления проводились в рамках обобщенного градиентного приближения (GGA) – обменно-корреляционного функционала PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) с коррекцией Grimme, учитывающей ванн-дер-ваальсово взаимодействие [23]. Для нахождения переходного состояния и потенциальных барьеров при переходе вакансии водорода внутри Mg_2NiH_4 был применен метод упругой ленты (nudged elastic band).

На начальном этапе работы была смоделирована элементарная моноклинная ячейка Mg_2NiH_4 . При оптимизации ее геометрии для интегрирования по первой зоне Бреллюэна (1BZ) эта зона автоматически разбивалась на сетку $6 \times 6 \times 2$, выбранную по схеме Монхорста-Пака [24]. Далее для изучения диффузии вакансии водорода в Mg_2NiH_4 была сконструирована суперячейка из $2 \times 2 \times 1$ элементарных ячеек. При нахождении оптимальных геометрий суперячейки количество k-точек вдоль каждого из направлений составляло $2 \times 2 \times 2$. Энергия обрезания плоских волн E_{cutoff} в расчетах была равна 269,5 эВ. При моделировании всех исследуемых структур оптимизация геометрии проводилась до значения максимальных сил, действующих на атомы, равных 0,01 эВ/Å.

Для различных вакансий водорода в Mg_2NiH_4 были рассчитаны их энергии образования.

Расчет энергии образования вакансии в Mg_2NiH_4 реализовывался по формуле:

$$E = (E_{\text{total}} - E_{\text{Mg}_2\text{NiH}_4} - 0,5E_{\text{H}_2}), \quad (1)$$

где E_{total} – полная энергия системы Mg_2NiH_4 с вакансией водорода, $E_{\text{Mg}_2\text{NiH}_4}$ – полная энергия интерметаллического гидрида Mg_2NiH_4 , E_{H_2} – энергия молекулы водорода.

Результаты и обсуждение. В ходе оптимизации геометрии элементарной ячейки Mg_2NiH_4 (рис. 1) была получена ее оптимальная геометрия, которая хорошо согласуется с установленной экспериментально (табл. 1) [10].

Далее, с помощью суперячейки Mg_2NiH_4 ($2 \times 2 \times 1$ элементарных ячеек), смоделированной из оптимальной геометрии элементарной ячейки, были найдены энергии образования вакансий водорода (рис. 2, табл. 2).

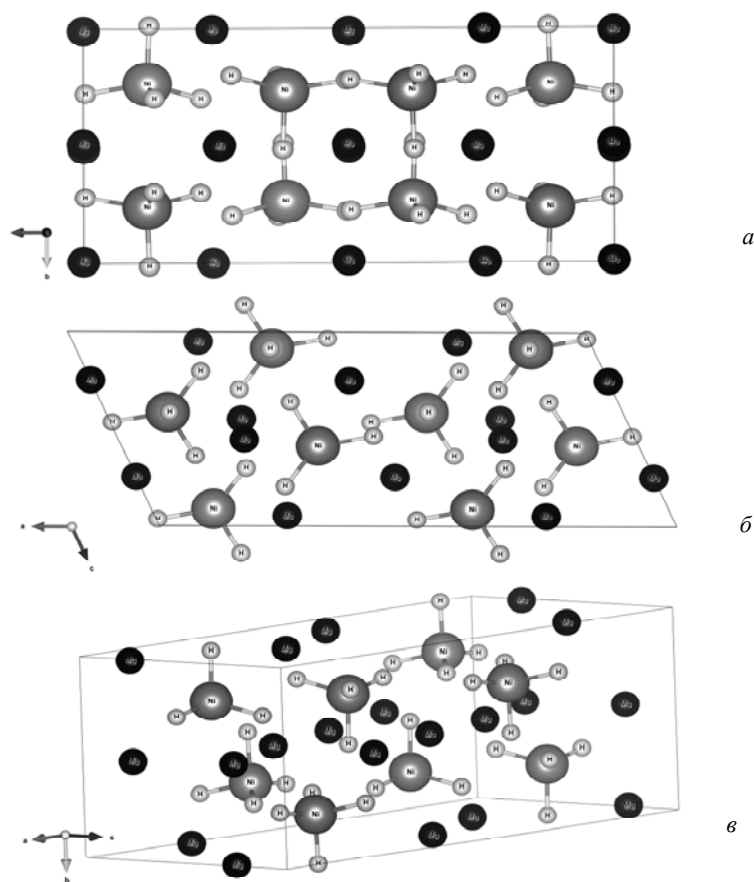


Рис. 1. Элементарная ячейка Mg_2NiH_4 :
 а – вид в направлении (100); б – вид в направлении (010); с – объемный вид ячейки

Таблица 1

Экспериментально определенные и рассчитанные параметры решетки Mg_2NiH_4

Параметры решетки	a, Å	b, Å	c, Å
Экспериментальные	6,4038	6,4830	14,3430
Рассчитанные	6,2403	6,2814	13,9577

В работе рассматривались четыре возможные неэквивалентные вакансии 1–4 (рис. 2), а также три вспомогательные для оценки потенциальных барьеров перехода вакансии водорода между соседними никелями.

При этом положения 5 и 7 являются аналогами 1, положение 6 – аналог 2.

Согласно рассчитанным энергиям образования различных вакансий наиболее стабильным положением оказалось 4 (рис. 2, табл. 2). Также стоит отметить, что положения 1 и 3 являются эквивалентными.

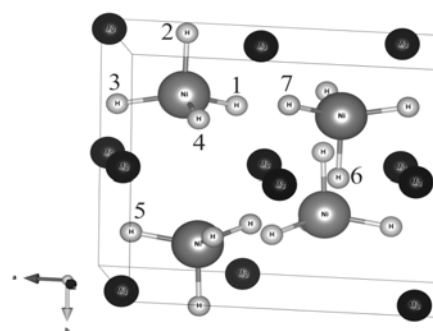


Рис. 2. Положения вакансий водорода в Mg_2NiH_4

Таблица 2

Значения энергии образования вакансии водорода в Mg_2NiH_4

Положение водорода	Энергия образования вакансии E , эВ
1	1,1617
2	1,0386
4	1,0074

В ходе изучения диффузии вакансии водорода рассматривались различные пути его миграции: в пределах одного атома (1–2, 1–4) и между соседними атомами никеля (4–5, 1–6, 4–7) (рис. 2). Как видно из табл. 3 миграция вакансии водорода в пределах одного атома никеля осуществляется легко в виду невысоких потенциальных барьеров перехода.

Таблица 3

Значения величин потенциального барьера перехода вакансии водорода в Mg_2NiH_4

Начальное и конечное положения вакансии водорода	Потенциальный барьер перехода, эВ	
	в прямом направлении	в обратном направлении
1–2	0.27	0.39
1–4	0.35	0.50
4–5	0.85	0.69
1–6	0.94	1.07
4–7	1.27	1.11

Не смотря на это, диффузия вакансии к соседнему атому никеля затруднена. Таким образом, при некоторой степени гидрирования интерметаллида Mg_2Ni на его поверхности будет образовываться пассивирующая пленка гидрида, формированию которой способствуют высокая стабильность комплексов NiH_4 и высокие потенциальные барьеры перехода вакансии водорода между соседними атомами никеля.

В ходе работы с помощью DFT расчетов были определены энергии образования вакансий водорода в интерметаллическом гидриде Mg_2NiH_4 . Установлено, что наиболее выгодное расположение вакансии водорода 4 (рис. 2). Согласно полученным результатам по моделированию диффузии водорода по вакансионному механизму, можно сделать вывод об образовании пассивирующей пленки Mg_2NiH_4 на поверхности Mg_2Ni . Следовательно применение данного интерметаллида без допантов в качестве матрицы для хранения водорода нецелесообразно.

Авторы выражают благодарность Институту компьютерного моделирования СО РАН (Красноярск), Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН (Москва), компьютерному центру СФУ, а также НИИЦ МГУ Лаборатории параллельных информационных технологий (система СКИФ МГУ «Чебышев») [25] за предоставление возможности использования вычислительных кластеров, на которых были проведены все расчеты.

Библиографические ссылки

1. Семененко К. Н., Вербецкий В. Н., Кочуков А. В. Взаимодействие с водородом сплавов системы магний-лантан // Доклады АН СССР, 1981. № 258. С. 362–366.
2. Вербецкий В. Н., Митрохин С. В. Гидриды интерметаллических соединений – синтез, свойства и применение для аккумулирования водорода // Альтернативная энергетика и экология. 2005. № 10. С. 41–50.
3. Kyoi D., Sato T., Ronnebro E., Noréus D. et al. A new ternary magnesium–titanium hydride Mg_7TiH_x with hydrogen desorption properties better than both binary magnesium and titanium hydrides // J. Alloys Compd., 2004. Vol. 372. P. 213–217.
4. Dantzer P. Topics in Applied Physics, Hydrogen in Metals III. Berlin: Springer, 1997. Vol. 73. P. 279–340.
5. Gupta M., Shlapbach L. Metal–hydride technology: a critical review // Topics in Applied Physics, Hydrogen in Intermetallic Compounds, Berlin: Springer, 1988. Vol. 63. P. 139–217.
6. Теоретическое исследование сорбции и диффузии водорода в интерметаллиде Mg_2Ni / А. А. Кузубов, Н. С. Елисеева, П. О. Краснов и др. // Вестник СибГАУ. 2012. № 5 (45). С. 163–167.
7. Reilly J. J., Wiswall R. H. Reaction of hydrogen with alloys of magnesium and nickel and the formation of Mg_2NiH_4 // Inorg. Chem., 1968. Vol. 7. P. 2254–2256.
8. Yvon K., Schefer J., Stucki F. Structural studies of hydrogen storage material Mg_2NiH_4 . Cubic high-temperature structure // Inorg. Chem., 1981. Vol. 20. P. 2776–2778.
9. Gupta M., Esther Belin, Louis Schlapbach Density of occupied states of intermetallic hydride NiMg_2H_4 // J. Less-Common Met., 1984. Vol. 103. P. 389–399.
10. Zolliker P., Yvon K., Jorgensen J. D., Rotella F. J. Structural studies of the hydrogen storage material magnesium nickel hydride (Mg_2NiH_4). 2. Monoclinic low-temperature structure // Inorg. Chem., 1986. Vol. 25. P. 3590–3593.
11. Calculation of thermodynamic, electronic, and optical properties of monoclinic Mg_2NiH_4 / W. R. Myers, L.-W. Wang, T. J. Richardson, M. D. Rubin // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. P. 4879–4884.
12. Haussermann U., Helen Blomqvist, Dag Noréus Bonding and Stability of the Hydrogen Storage Material Mg_2NiH_4 // Inorg. Chem. 2002. Vol. 41. P. 3684–3692.
13. Jasen P. V., Estela A. González, Graciela Brizuela, Oscar A. Nagel, Gustavo A. González, Alfredo Juan A theoretical study of the electronic structure and bonding of the monoclinic phase of Mg_2NiH_4 // J. Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32. P. 4943–4948.
14. First-principles investigation of Mg_2Ni phase and high/low temperature Mg_2NiH_4 complex hydrides / J. Zhang, D. W. Zhou, L. P. He, P. Peng, J. S. Liu // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 2009. Vol. 70. P. 32–39.
15. Züttel A. Materials for hydrogen storage // Materials Today. 2003. Vol. 9. P. 24–33.
16. Kresse G., Hafner Ab initio molecular dynamics for liquid metals // J. Phys. Rev. B. 1993. Vol. 47. P. 558–561.

17. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal–amorphous-semiconductor transition in germanium // *Phys. Rev. B*. 1994. Vol. 49. P. 14251–14269.
18. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // *Phys. Rev. B*. 1996. Vol. 54. P. 11169–11186.
19. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // *Phys. Rev.* 1964. Vol. 136. P. 864–869.
20. Kohn W., Sham L. J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects // *Phys. Rev.* 1965. Vol. 140. P. 1133–1138.
21. Blöchl P. E. Phys. Projector augmented-wave method // *Rev. B*, 1994. Vol. 50. P. 17953–17979.
22. Kresse G., Joubert J. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented wave method // *Phys. Rev. B*. 1999. Vol. 59. P. 1758–1775.
23. Grimme S. Semiempirical Semiempirical GGA-type density functional constructed with a long-range dispersion correction // *J. Comp. Chem.* 2006. Vol. 27. P. 1787–1799.
24. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations // *Phys. Rev. B*. 1976. Vol. 13. P. 5188–5192.
25. Практика суперкомпьютера «Ломоносов» / В. В. Воеводин, С. А. Жуматий, С. И. Соболев и др. // *Открытые системы*. 2012. № 7. С. 36–39.
6. Eliseeva N. S., Kuzubov A. A., Krasnov P. O., Fedorov A. S., Lyhin A. O. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 5 (45), p. 163–167.
7. Reilly J. J., Wiswall R. H. *Inorg. Chem.*, 1968, no. 7, p. 2254–2256.
8. Yvon K., Schefer J., Stucki F. *Inorg. Chem.*, 1981. no. 20, p. 2776–2778.
9. Gupta M., Esther Belin, Louis Schlapbach *J. Less-Common Met.*, 1984, no. 103, p. 389–399.
10. Zollner P., Yvon K., Jorgensen J. D., Rotella F. J. *Inorg. Chem.*, 1986, no. 25, p. 3590–3593.
11. Myers W. R., Wang L.-W., Richardson T. J., Rubin M. D. *J. Appl. Phys.*, 2002, no. 91, p. 4879–4884.
12. Haussermann U., Helen Blomqvist, Dag Noréus *Inorg. Chem.*, 2002, no. 41, p. 3684–3692.
13. Jasen P. V., Estela A. González, Graciela Brizuela, Oscar A. Nagel, Gustavo A. González, Alfredo Juan J. *Hydrogen Energy*, 2007, no. 32, p. 4943–4948.
14. Zhang J., Zhou D. W., He L. P., Peng P., Liu J. S. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2009, no. 70, p. 32–39.
15. Züttel A. *Materials Today*, 2003, no. 9, p. 24–33.
16. Kresse G., Hafner J. *Phys. Rev. B*, 1993, no. 47, p. 558–561.
17. Kresse G., Hafner J. *Phys. Rev. B*, 1994, no. 49, p. 14251–14269.
18. Kresse G., Furthmüller J. *Phys. Rev. B*, 1996, no. 54, p. 11169–11186.
19. Hohenberg P., Kohn W. *Phys. Rev.*, 1964, no. 136, p. 864–869.
20. Kohn W., Sham L. J. *Phys. Rev.*, 1965, no. 140, p. 1133–1138.
21. Blöchl P. E. *Phys. Rev. B*, 1994, no. 50, p. 17953–17979.
22. Kresse G., Joubert J. *Phys. Rev. B*, 1999, no. 59, p. 1758–1775.
23. Grimme S. Semiempirical *J. Comp. Chem.*, 2006, no. 27, p. 1787–1799.
24. Monkhorst H. J., Pack J. D. *Phys. Rev. B*, 1976, no. 13, p. 5188–5192.
25. Voevodin V. V., Zhumatij S. A., Sobolev S. I et al. *Otkrytye sistemy* (Open systems), 2012, no. 7, pp. 36–39.

References

1. Semenenko K. N., Verbeckij V. N., Kochukov A. V. *Doklady An SSSR*, 1981, no. 258, p. 362–366.
2. Verbeckij V. N., Mitrohin S. V. *Alternativnaja jenergetika i jekologij*, 2005, no. 10, p. 41–50.
3. Kyoj D., Sato T., Ronnebro E., Nore'us D. at al. *J. Alloys Compd.*, 2004, no. 372, p. 213–217.
4. Dantzer P. *Topics in Applied Physics, Hydrogen in Metals III*. Berlin: Springer, 1997, no. 73, p. 279–340.
5. Gupta M., Shlapbach L. *Topics in Applied Physics, Hydrogen in Intermetallic Compounds*, Berlin: Springer, 1988, no. 63, p. 139–217.

© Кузубов А. А., Елисеева Н. С., Краснов П. О., Кузлин А. В., Сержантова М. В., 2013

УДК 544.18

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ ВОДОРОДА В ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯХ Al_3Ti , Al_3Ni И Al_4Pd *

А. В. Кузлин^{1,4}, Н. С. Елисеева^{1,2,4}, А. А. Кузубов^{1,2,4}, П. О. Краснов^{2,3,4}, М. В. Сержантова⁴

¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный 79

²Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Россия, 660036, Красноярск, ул. Академгородок 50/38

³Сибирский государственный технологический университет

Россия, 660049, Красноярск, просп. Мира, 82

⁴Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: alex_xx@rambler.ru

Представлено теоретическое исследование интерметаллидов Al_3Ti , Al_3Ni и Al_4Pd как потенциальных материалов, которые могут образовываться при синтезе тонких пленок титана, никеля и палладия на поверхности алюминия. При помощи теории функционала плотности изучена возможность образования гидридов данных соединений.

Ключевые слова: водородная энергетика, сорбция водорода, теория функционала плотности (DFT), Al_3Ti , Al_3Ni , Al_4Pd .

THEORETICAL STUDY OF HYDROGEN SORPTION IN INTERMETALLIC COMPOUNDS Al_3Ti , Al_3Ni AND Al_4Pd

A. V. Kuklin^{1,4}, N. S. Eliseeva^{1,2,4}, A. A. Kuzubov^{1,2,4}, P. O. Krasnov^{2,3}, M. V. Serzhantova⁴

¹Siberian Federal University

79 Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia

²Institute of Physics named after academician L. V. Kirenskiy

50, buiding 38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

³Siberian State Technological University

82 Mira prosp., Krasnoyarsk, 660049, Russia

⁴Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: alex_xx@rambler.ru

Aluminium is one of the most promising materials for hydrogen storage with high volumetric density. Furthermore, the excellent kinetics of hydrogenation and dehydrogenation can be achieved with surface modification of some transition metals. The possibility of hydrogen usage at the Al_3Ti , Al_3Ni and Al_4Pd phases, which can be obtained by high-temperature synthesis, was investigated by density functional calculations.

Keywords: hydrogen storage, sorption, DFT, Al_3Ti , Al_3Ni , Al_4Pd .

Водород, как высокоэффективный, возобновляемый и экологически чистый энергоноситель, имеет большие перспективы для широкого использования в энергетике, особенно как топлива для транспортных средств [1; 2].

Наиболее перспективным методом считается хранение водорода в абсорбированном состоянии. Гидриды металлов, такие как MgH_2 , AlH_3 , $NaAlH_4$, LiH и другие, с разной степенью эффективности, могут быть использованы в качестве носителя для водорода, часто обратимо. Перспективным металлом для хранения водорода является алюминий ввиду низкой стои-

мости, малой молярной массы, доступности и не токсичности.

Одной из проблем использования данного материала в качестве аккумулятора водорода является плохая кинетика реакции сорбции / десорбции. Причина медленной абсорбции водорода связана с высокой окислительной чувствительностью и затрудненностью диссоциации молекул водорода на поверхности, предшествующей диффузии внутрь. Улучшение кинетики реакции может быть достигнуто путем уменьшения размера частиц и модифицированием переходными металлами [3–5].

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В.37.21.0916.

В обычных условиях гидрид алюминия (алан) имеет полимерную молекулярную структуру $(\text{AlH}_3)_n$, при этом его кристаллическая форма существует в семи полиморфных модификациях: α -(AlH_3)_n, α^1 -(AlH_3)_n, β -(AlH_3)_n, δ -(AlH_3)_n, ϵ -(AlH_3)_n, γ -(AlH_3)_n, ζ -(AlH_3)_n [6]. Самой устойчивой является модификация α -(AlH_3)_n, имеющая гексагональную сингонию (пространственная группа R3c, $a = 4,449 \text{ \AA}$, $b = 4,449 \text{ \AA}$, $c = 11,804 \text{ \AA}$) [7; 8].

Авторами работы [9] показано, что размол AlH_3 в шаровой мельнице приводит к увеличению скорости десорбции водорода, вероятно, из-за увеличения свободной от оксида поверхности. В работах [10–13] показано, что допирование алюминия переходными металлами, такими как никель и титан, улучшает кинетику реакции и способствует хемосорбции водорода. Замещение алюминия титаном кинетически стабильно при комнатной температуре. В этом случае титан преимущественно располагается в поверхностном и приповерхностном слое. Размещение титана в поверхностном слое располагает к образованию парных комплексов, которые улучшают диссоциацию водорода [13]. Сочетая поверхностную ИК-спектроскопию и теорию функционала плотности, авторами работы [10] показано, что добавление титана приводит к снижению образования больших аланов, за счет уменьшения мобильности водорода и захвата малых аланов. Титан тем самым препятствует олигомеризации. Добавление титана также резко понижает температуру десорбции с 290 до 190 К. Контролируя размещение титана, можно дополнительно снизить барьеры активации распада молекул водорода, а также улучшить диффузию водорода в объем [14].

Однако в данной области исследований остается много открытых вопросов. В частности, неясно какие процессы происходят при более высоких температурах, которые требуются для протекания абсорбции водорода.

Предположительно, при добавлении к алюминию небольшого количества титана, никеля или палладия и их совместном нагревании, будут образовываться соединения вида Al_3Ti , Al_3Ni и Al_4Pd . Исходя из этого, целесообразно изучить поведение водорода в данных системах. Таким образом, целью работы являлось квантово-химическое исследование сорбции водорода в интерметаллических соединениях Al_3Ti , Al_3Ni и Al_4Pd .

Моделирование исследуемых объектов проводили с использованием квантово-химического пакета VASP (Vienna Ab-initio Simulation Package) [15–18] в рамках формализма функционала плотности (DFT) [19, 20], основанного на градиентном приближении (GGA). В расчетах применяли обменно-корреляционный потенциал PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) [21] и метод PAW (projector augmented-wave) [22].

Для изучения сорбции водорода в интерметаллидах, на начальном этапе работы были смоделированы элементарные ячейки Al_3Ti , Al_3Ni и Al_4Pd с пространственными группами симметрии I4/mmm, Pnma и P3c1 соответственно. Обратное пространство в первой зоне Брлюэна автоматически разбивалось на сетку по схеме Монхорста-Пака [23]. Количество k -точек вдоль каждого из направлений для Al_3Ti , Al_3Ni и Al_4Pd составляло $8 \times 8 \times 6$, $12 \times 12 \times 12$ и $2 \times 2 \times 3$ соответственно. При моделировании всех исследуемых структур оптимизация геометрии проводилась до значения максимальных сил, действующих на атомы, равных $0,01 \text{ эВ/\AA}$.

Получившиеся геометрии элементарных ячеек хорошо согласуются с экспериментальными данными (табл. 1).

Далее суперячейки всех интерметаллидов ($3 \times 3 \times 2$ для Al_3Ti , $2 \times 2 \times 2$ для Al_3Ni и $1 \times 1 \times 2$ для Al_4Pd) были получены путем трансляции элементарной ячейки вдоль каждого из направлений.

Для определения наиболее выгодных позиций атома водорода в объеме интерметаллидов были рассчитаны структуры с различным его расположением (рис. 1, 2, 3). При расчете структуры суперячеек количество k -точек вдоль каждого из направлений составляло $3 \times 3 \times 3$ для Al_3Ti , $2 \times 2 \times 2$ для Al_3Ni и для Al_4Pd .

Энергию связи между атомом водорода и суперячейкой для всех интерметаллидов рассчитывали по формуле:

$$E = E_T - E_S - E_H, \quad (1)$$

где E_T – полная энергия суперячейки с атомом водорода; E_S – энергия суперячейки; E_H – энергия, приходящаяся на один атом водорода в молекуле водорода.

Во всех интерметаллидах и для всех положений, энергии связи атома водорода со структурой суперячейки оказались положительными (табл. 2–4).

Таблица 1

Сравнение рассчитанных и экспериментальных параметров решетки ($\text{\AA}$)

Параметр	Al_3Ti		Al_3Ni		Al_4Pd	
	DFT	X-Ray [24]	DFT	X-Ray[25]	DFT	X-Ray[26]
a	3,8120	3,8537	6,5414	6,6114	13,010	13,086
b	3,8120	3,8537	7,3271	7,3662	13,010	13,086
c	8,6250	8,5839	4,7525	4,8112	9,674	9,633

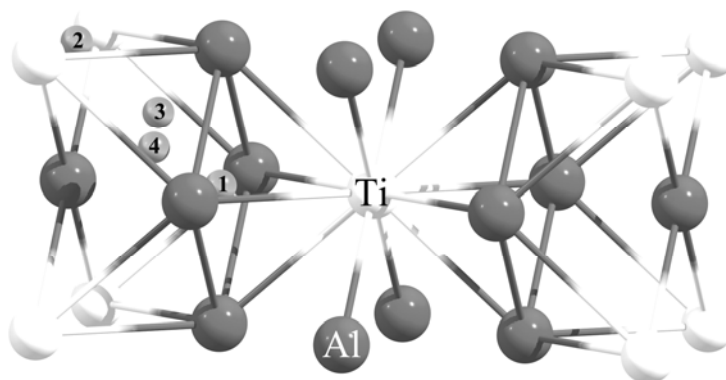


Рис. 1. Расположения атома водорода в структуре Al_3Ti

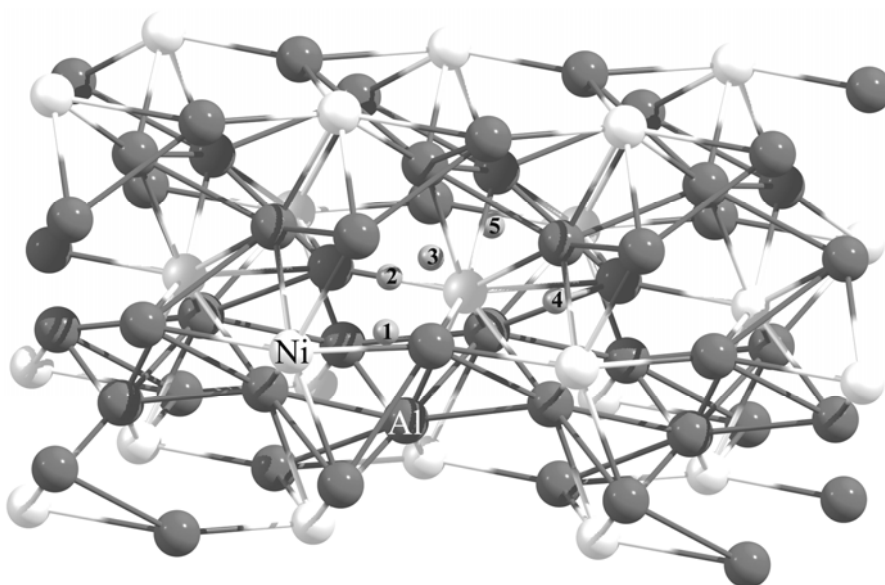


Рис. 2. Расположения атома водорода в структуре Al_3Ni

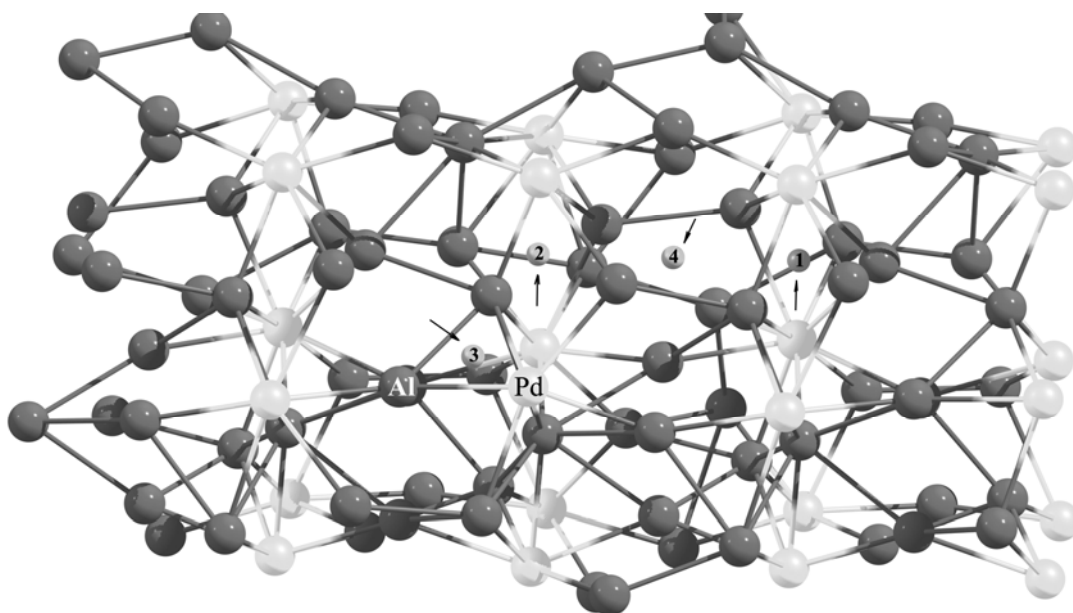


Рис. 3. Расположения атома водорода в структуре Al_4Pd

Таблица 2

Энергии образования суперячейки Al_3Ti с атомом водорода

Расположение атома водорода	Энергия, eV
1	0.0353
2	0.2441
3	0.2986
4	0.2972

Таблица 3

Энергии образования суперячейки Al_3Ni с атомом водорода

Расположение атома водорода	Энергия, eV
1	1.0373
2	1.0380
3	0.1016
4	1.0024
5	1.2352

Таблица 4

Энергии образования суперячейки Al_4Pd с атомом водорода

Расположение атома водорода	Энергия, eV
1	1.4190
2	1.4407
3	1.4310
4	0.8441

Исходя из данных таблиц, можно сделать вывод, что при нормальных условиях водороду несвойственно содержаться в данных соединениях. Эти теоретические выводы согласуются с экспериментальными данными работы [27], в которой проводилось исследование сорбции водорода в фазе Al_3Ti при высокой температуре и высоком давлении. Авторы отмечают, что при 10 ГПа и 898 К формируется гидрид с примерным составом Al_3TiH_x , где $x = 0,4$. Тем не менее, при понижении давления происходит дегидрирование и данная фаза гидрида не может быть восстановлена в условиях окружающей среды.

Таким образом, при высокотемпературном синтезе тонких пленок титана, никеля или палладия на границах взаимодействия металлов будут образовываться фазы состава Al_3Ti , Al_3Ni и Al_4Pd , которые будут мешать протеканию гидрирования.

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 вы-

числительных кластеров, на которых были проведены все расчеты.

Библиографические ссылки

1. Гамбург Д. Ю. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. М. : Химия, 1989. 672 с.
2. Ulf, B. Does a hydrogen economy make sense? // Proceedings of the IEEE. 2006. Vol. 94. P. 1826–1836.
3. Sakintuna B., Lamari-Darkrim F., Hirscher M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review // Int. J. Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32. P. 1121–1140.
4. Dopant-vacancy binding effects in Li-doped magnesium hydride / K. C. Smith, T. S. Fisher, U. V. Waghmare, R. Grau-Crespo // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 82. P. 134109(9).
5. Catalytic effect of transition metals on hydrogen sorption in nanocrystalline ball milled MgH_2 –Tm (Tm = Ti, V, Mn, Fe and Ni) systems / G. Liang, J. Huot, S. Boily et al. // J. Alloys Comp. 1999. Vol. 292. P. 247–252.
6. Preparation and properties of aluminum hydride / F. M. Brower, N. E. Matzek, P. F. Reigler et al. // J. Am. Chem. Soc. 1976. Vol. 98. P. 2450–2453.
7. Turley W., Rinn H. W. The crystal structure of aluminum hydride // Inorg. Chem. 1969. Vol. 8. P. 18–22.
8. Konovalov S. K., Bulychiev B. M. The P,T-state diagram and solid phase synthesis of aluminium hydride // Inorg. Chem. 1994. Vol. 34. P. 172–175.
9. Accelerated thermal decomposition of AlH_3 for hydrogen-fueled vehicles / G. Sandrock, J. Reilly, J. Graetz et al. // Appl. Phys. A. 2005. Vol. 80. P. 687–690.
10. Effect of titanium doping of Al(111) surfaces on alane formation, mobility, and desorption / I. S. Chopra, S. Chaudhuri, J.-F. Veyan et al. // J. Phys. Chem. C. 2011. Vol. 115. P. 16701–16710.
11. Location of Ti catalyst in the reversible AlH_3 adduct of triethylenediamine / D. D. Graham, J. Graetz, J. Reilly et al. // J. Phys. Chem. C. 2010. Vol. 114. P. 15207–15211.
12. Local bonding and atomic environments in Ni-catalyzed complex hydrides / J. Graetz, S. Chaudhuri, T. T. Salguero et al. // Nanotechnology. 2009. Vol. 20. P. 204007(8).
13. Short-range order of low-coverage Ti /Al(111): Implications for hydrogen storage in complex metal hydrides / E. Muller, E. Sutter, P. Zahl, C. V. Ciobanu, P. Sutter // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. P. 151917(3).
14. Site-dependent activity of atomic Ti catalysts in Al-based hydrogen storage materials / A. Al-Mahboob, E. Muller et al. // J. Am. Chem. Soc. 2012. Vol. 134. P. 10381–10384.
15. Kresse G., Joubert D. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 59. P. 1758–1775.
16. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals // Phys. Rev. B. 1993. Vol. 47. P. 558–561.
17. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal–amorphous-semiconductor

transition in germanium // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49. P. 14251–14269.

18. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54. P. 11169–11186.

19. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // Phys. Rev. 1964. Vol. 136. P. 864–869.

20. Kohn W., Sham L. J. Self-consistent equations including exchange and correlation effects // Phys. Rev. 1965. Vol. 140. P. 1133–1138.

21. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // Phys. Rev. 1996. Vol. 77. P. 3865–3868.

22. Blöchl P. E. Projector augmented-wave method // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. P. 17953–17979.

23. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations // Phys. Rev. B. 1976. Vol. 13. P. 5188–5192.

24. Kumar K. S. X-Ray Peak Intensifies for the Binary Compound AlTi // Powder Diffraction. 1990. Vol. 5. P. 165–167.

25. Observation of glide dislocations in D0₂₀ ordered Al₃Ni / K. Yamashita, I. Fujimoto, T. Murakumo et al. // Philosophical Magazine A. 2000. Vol. 80. P. 219–235.

26. Sastry G. V. S., Suryanarayana C., van Tendeloo G. A Structural Study of Vapour-Deposited Al–Pd Alloys // Phys. Stat. Sol. 1982. Vol. 73. P. 267–278.

27. Hydrogenation of Al₃Ti at High Pressure and High Temperature / H. Saitoh, A. Machida, Y. Katayama, K. Aoki // Materials Transactions. 2011. Vol. 52. P. 602–604.

References

1. Gamborg D. Ju. *Vodorod. Svoystva, poluchenie, hranenie, transportirovanie, primeneniye* (Hydrogen. Properties, production, storage, transportation and application). Moscow, Himija, 1989. 672 p.

2. Ulf B. Proceedings of the IEEE, 2006, vol. 94, p. 1826–1837.

3. Sakintuna B., Lamari-Darkrim F., Hirscher M. Int. J. Hydrogen Energy, 2007, vol. 32, p. 1121–1140.

4. Smith K. C., Fisher T. S., Waghmare U. V., Grau-Crespo R. Phys. Rev. B, 2010, vol. 82, p. 134109(9).

5. Liang G., Huot J., Boily S., Van Neste A., Schulz R. J. Alloys Comp., 1999, vol. 292, p. 247–252.

6. Brower F. M., Matzek N. E., Reigler P. F., Rinn H. W., Roberts C. B., Schmidt D. L., Snover J. A., Terada K. J. Am. Chem. Soc., 1976, vol. 98, p. 2450–2453.

7. Turley W., Rinn H. W. Inorg. Chem., 1969, vol. 8, p. 18–22.

8. Kononov S. K., Bulychiev B. M. Inorg. Chem., 1994, vol. 34, p. 172–175.

9. Sandroock G., Reilly J., Graetz J., Zhou W.-M., Johnson J., Wegrzyn J. Appl. Phys. A., 2005, vol. 80, p. 687–690.

10. Chopra I. S., Chaudhuri S., Veyan J.-F., Graetz J., Chabal Y. J. J. Phys. Chem. C., 2011, vol. 115, p. 16701–16710.

11. Graham D. D., Graetz J., Reilly J., Wegrzyn J. E., Robertson I. M. J. Phys. Chem. C., 2010, vol. 114, p. 15207–15211.

12. Graetz J., Chaudhuri S., Salguero T. T., Vajo J. J., Meyer M. S., Pinkerton F. E. Nanotechnology, 2009, vol. 20, p. 204007(8).

13. Muller E., Sutter E., Zahl P., Ciobanu C. V., Sutter P. Appl. Phys. Lett., 2007, vol. 90, p. 151917(3).

14. Al-Mahboob A., Muller E., Karim A., Muckerman J. T., Ciobanu C. V., Sutter P. J. Am. Chem. Soc., 2012, vol. 134, p. 10381–10384.

15. Kresse G., Joubert D. Phys. Rev. B, 1999, vol. 59, p. 1758–1775.

16. Kresse G., Hafner J. Phys. Rev. B, 1993, vol. 47, p. 558–561.

17. Kresse G., Hafner J. Phys. Rev. B, 1994, vol. 49, p. 14251–14269.

18. Kresse G., Furthmüller J. Phys. Rev. B, 1996, vol. 54, pp. 11169–11186.

19. Hohenberg P., Kohn W. Phys. Rev., 1964, vol. 136, p. 864–869.

20. Kohn W., Sham L. J. Phys. Rev., 1965, vol. 140, p. 1133–1138.

23. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Phys. Rev., 1996, vol. 77, p. 3865–3868.

24. Blöchl P. E. Phys. Rev. B, 1994, vol. 50, p. 17953–17979.

23. Monkhorst H. J., Pack J. D. Phys. Rev. B, 1976, vol. 13, p. 5188–5192.

24. Kumar K. S. Powder Diffraction, 1990, vol. 5, p. 165–167.

25. Yamashita K., Fujimoto I., Murakumo T., Kumal S., Sato A. Philosophical Magazine A, 2000, vol. 80, p. 219–235.

26. Sastry G. V. S., Suryanarayana C., van Tendeloo G. Phys. Stat. Sol., 1982, vol. 73, p. 267–278.

27. Saitoh H., Machida A., Katayama Y., Aoki K. Materials Transactions, 2011, vol. 52, p. 602–604.

УДК 548.571

**ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ
В ЛЕГИРОВАННЫХ ПРИМЕСЯМИ МОНОКРИСТАЛЛАХ CdTe, ZnS и ZnSe**Ю. Ю. Логинов¹, А. В. Можжерин¹, А. В. Брильков²¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: loginov@sibsau.ru²Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: abrilkov@sfu-kras.ru

Методом просвечивающей электронной микроскопии исследованы закономерности образования структурных дефектов в легированных и нелегированных полупроводниках CdTe, ZnS и ZnSe, выращенных из газовой фазы. Установлено, что при отжиге в легированных полупроводниках образуются примесные выделения на ростовых дислокациях и дефектах упаковки, при этом происходит перемещение дислокаций. Образование примесных выделений (преципитатов) на ростовых дефектах объясняется миграцией примесей и точечных дефектов на дислокации с формированием пересыщенного твердого раствора, который конденсируется в виде преципитатов, содержащих легирующую примесь. Содержание легирующей примеси в преципитатах подтверждается локальным электронно-зондовым микроанализом.

Ключевые слова: структурные дефекты, дислокации, преципитаты, просвечивающая электронная микроскопия, полупроводники.

**THE ELECTRON MICROSCOPIC STUDY OF THE DEFECT FORMATION
IN THE DOPED SINGLE CRYSTALS CdTe, ZnS and ZnSe**Yu. Yu. Loginov¹, A. V. Mozherin¹, A. V. Brilikov²¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: loginov@sibsau.ru²Siberian Federal University
79 Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: abrilkov@sfu-kras.ru

The structural defects formation in the doped and not doped semiconductors CdTe, ZnS and ZnSe grown from the gas phase were investigated by transmission electron microscopy. It is found that the annealing of doped semiconductors leads to the formation of impurity precipitates at the grown-in dislocations and stacking faults, that leads to dislocation migration. The precipitate formation at the growth defects due to the migration of point defects and impurities on the dislocation with the formation of a supersaturated solid solution which is condensed in the form of precipitates containing dopant. The content of impurities in precipitates is confirmed by the local electron probe microanalysis.

Keywords: structural defects, dislocations, precipitates, transmission electron microscopy, semiconductors.

Полупроводниковые материалы и приборы широко применяются в космических аппаратах, устройствах электроники, изготовлении солнечных элементов [1]. В процессе выращивания и термообработок в полупроводниковых кристаллах формируются структурные дефекты, размеры и плотность которых зависят от условий обработки и природы материалов [1; 2]. С целью улучшению качества получаемых полупроводниковых кристаллов важным является контроль типа и плотности дефектов при различных технологических режимах и установление механизмов их формирования.

В данной работе методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследовали полупроводниковые кристаллы CdTe, ZnS и ZnSe, выращенные из газовой фазы в запаянной ампуле и легирован-

ные Ga и отдельно In с концентрацией $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $1.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $2.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, соответственно для CdTe, ZnS и ZnSe. Содержание Ga и In в кристаллах контролировали методом атомного абсорбционного анализа с помощью прибора Perkin-Elmer 5000. Часть образцов ZnS и ZnSe отжигали при 850°C в течение трех дней в вакууме, в парах Zn в запаянной кварцевой ампуле, а CdTe в атмосфере паров Cd при 650°C также в течение трех дней.

Электронно-микроскопические исследования проводили на приборах JEM-100 CX и JEM-2100 с использованием электронно-зондового микроанализа и метода дифракции электронов, темнопольной и светлопольной трансмиссионной электронной микроскопии. Образцы для исследования в ПЭМ приготавливали стандартным методом, сначала механически

уточная, используя устройство Gatan Dimple Grinder, а затем ионным травлением на установке Precision Ion Polishing System (PIPS), Gatan.

В ходе исследований установлено, что в кристаллах без отжига имеются ростовые дислокации и дефекты упаковки (рис. 1, а). Также видны хорошо развитые параллельные полосы (страты), свидетельствующие о политипной модификации ZnS. Они особенно видны, когда вектор дифракции g перпендикулярен полосам. Каких либо примесных выделений в этих образцах не обнаружено.

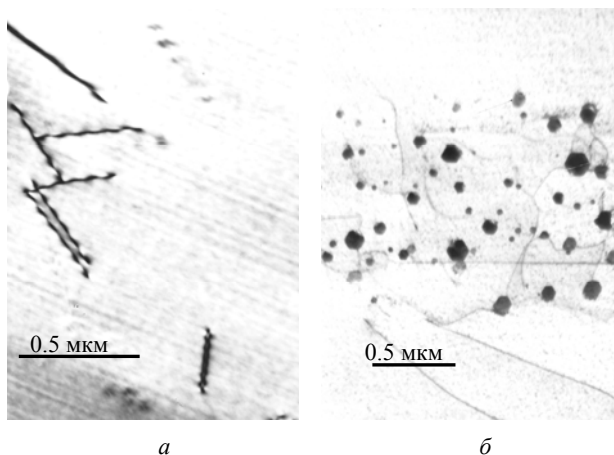


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение ZnS(In): а – до отжига; б – после отжига при 850 °C

В образцах ZnS(In), отожженных в парах цинка, наблюдается большое число примесных выделений (преципитатов), которые декорируют ростовые дислокации и дефекты упаковки (рис. 1, б). Небольшие преципитаты имеют форму близкую к сферической, в то время как более крупные имеют четко выраженную шестигранную огранку. Локальная плотность преципитатов составляет $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$, а их размеры изменяются в пределах от 30 до 200 нм. Подобные дефекты были обнаружены в ZnS, легированном Ga, также после отжига в атмосфере цинка.

Отжиг кристаллов ZnSe(In) в парах цинка при 850 °C в течение трех дней также ведет к образованию колоний преципитатов на дислокациях и дефектах упаковки. Формирование примесных выделений в ZnSe(In) аналогично процессам, наблюдаемым в ZnS, легированном In или Ga.

Природа преципитатов была установлена с помощью метода энерго-дисперсионного рентгеновского микроанализа. Варьируя размер конденсорной диафрагмы можно получить диаметр электронного пучка $\sim 0.2 \text{ мкм}$, что сравнимо с размерами отдельных преципитатов.

Спектр рентгеновского характеристического излучения, полученный с места локализации отдельных преципитатов в ZnSe(In) приведен на рис. 2. Видно, что имеется пик, связанный с In. Спектры рентгеновского излучения, полученные с соседних областей, не содержащих преципитаты, не имеют пиков, связанных с In или Ga. Таким образом, следует считать, что

преципитаты обогащены легирующей примесью In в ZnSe(In), ZnS(In) и Ga в ZnS(Ga).

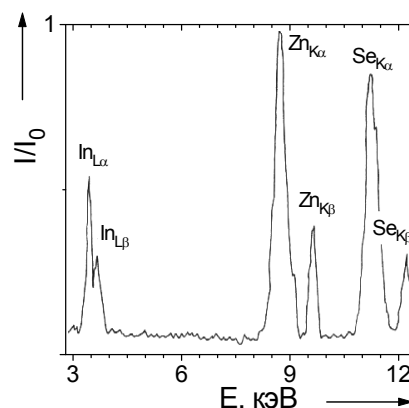


Рис. 2. Спектр характеристического рентгеновского излучения с области ZnSe(In), содержащей преципитаты

В кристаллах CdTe, легированных In или Ga, также обнаружены примесные выделения на дислокациях после термоотжига. Электронно-зондовый микроанализ с области содержащей преципитаты показал наличие легирующей примеси в преципитатах.

На рис. 3 показан электронно-микроскопический снимок преципитата с области CdTe, легированного In, на котором отчетливо видны линии полосчатого муарового контраста, возникающего при разориентации решеток матрицы и выделения.

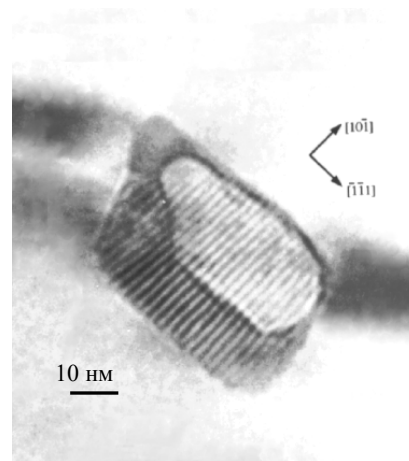


Рис. 3. Муаровый контраст на изображении преципитата, образовавшегося в CdTe(In) после отжига в атмосфере Cd при 650 °C в течение трех дней

Период муарового контраста D , возникающий при повороте решеток с параметрами d_1 и d_2 на угол α , может быть определен как [3]:

$$D = \frac{d_1 d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos \alpha}} \quad (1)$$

или

$$D = \frac{d_1 d_2}{d_1 - d_2}, \text{ если } \alpha = 0. \quad (2)$$

Экспериментальные значения периода муарового контраста D и сравнение расчетных d_x и известных d величин межплоскостных расстояний

Экспериментальные значения			Известные значения [4]				
D , нм	hkl	d_x , нм	d , нм	соединение	тип решетки	hkl	I/I_0 , %
1,848	111	0,308	0,307	InTe	кубич.	200	100
			0,309	In ₃ Te ₄	гексаг.	107	100
			0,306	In ₂ Te ₃	кубич.	600	50

Зная межплоскостные расстояния $d_{hkl}(\text{CdTe})$ для определенных плоскостей отражения (h, k, l – индексы Миллера), соответствующих векторам дифракции g_{hkl} , а также экспериментально измеренные периоды D_i можно рассчитать межплоскостные расстояния d_x кристаллической решетки преципитата.

Из рис.3 следует, что полосы муарового контраста параллельны плоскостям $\{111\}$ и $D = 1,848$ нм, а $\alpha = 0$. Это позволяет рассчитать $d_x = 0,3083$ нм. Возможные варианты известных величин d приведены в таблице. Видно, что расчетному значению d_x соответствуют с высоким процентом интенсивности излучения межплоскостные расстояния от InTe(кубич.) и In₃Te₄(гексаг.). В процентах указана интенсивность линии излучения (I/I_0).

Формирование примесных преципитатов на дислокациях можно объяснить тем, что в процессе отжига в атмосфере Zn для ZnS и ZnSe или Cd для CdTe легирующая примесь, первоначально локализованная в позициях катиона, вытесняется атомами цинка (кадмия) из узловых позиций в междоузельные, что обуславливает миграцию In или Ga на дислокации и дефекты упаковки, где происходит распад пересыщенного твердого раствора с формированием преципитатов.

Процесс сопровождается трансформацией ростовых дислокаций, что необходимо для релаксации упругих напряжений в матрице и характерно при взаимодействии точечных дефектов (вакансий и междоузельных атомов) с протяженными структурными дефектами. В частности, часть вакансий решетки матрицы, по-видимому, уходит в область формирования преципитата, предоставляя тем самым определенный объем для атомов, образующих преципитат. Об этом свидетельствует отсутствие развитого деформационного контраста вокруг отдельных преципитатов на электронно-микроскопических снимках. Нескомпенсированная часть собственных междоузельных атомов матрицы может вызывать неконсервативное перемещение дислокаций. Процесс преципитации примесей на дислокациях лимитируется диффузией атомов Se (Te), которые расходуются как при переполза-

нии дислокаций, так и при формировании новой фазы типа InTe или In₂Te₃ в случае CdTe.

Таким образом, установлено, что при отжиге легированных полупроводников CdTe, ZnS и ZnSe в них образуются примесные выделения на ростовых дислокациях и дефектах упаковки и происходит перемещение дислокаций. Образование примесных выделений объясняется миграцией примесей и точечных дефектов на дислокации с формированием пересыщенного твердого раствора, который конденсируется в виде преципитатов, содержащих легирующую примесь.

Библиографические ссылки

1. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / под ред. А. Л. Асеева. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. 368 с.
2. Логинов Ю. Ю., Браун П. Д., Дьюроуз К. Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках A_2B_6 . М. : Логос, 2003. 304 с.
3. Хирш П., Хови А., Николсон Р. Электронная микроскопия тонких кристаллов. М. : Мир, 1967. 574 с.
4. Selected powder diffraction data for metals and alloys. Data book. Vol. 1, 2. Swarthmore, Pennsylvania: JCPDS, 1978. 1929 p.

References

1. *Nanotehnologii v poluprovodnikovoi elektronike* (Nanotechnology in semiconductor electronics) / Ed. A. L. Aseev. Novosibirsk, SO RAN, 2004, 368 p.
2. Loginov Y. Y., Brown P. D., Durose K. *Zakonomernosti formirovaniya strukturnih defektov v poluprovodnikah A_2B_6* (The structural defect formation in semiconductors A_2B_6). Moscow, Logos, 2003, 304 p.
3. Hirsch P., Howie A., Nicholson R. *Electronnaya mikroskopiya tonkih kristallov* (Electron microscopy of thin crystals). Moscow, Mir, 1967, 574 p.
4. Selected powder diffraction data for metals and alloys. Data book. Vol. 1, 2. Swarthmore, Pennsylvania, JCPDS, 1978, 1929 p.

© Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В., Брильков А. В., 2013

УДК 537.632

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ВКЛАДА В КОЭФФИЦИЕНТЫ ФРЕНЕЛЯ ПРИ МАГНИТОЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

О. А. Максимова^{1,2}, С. Г. Овчинников^{1,2}, U. Hartmann³, Н. Н. Косырев¹, С. Н. Варнаков^{1,4}

¹Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38

²Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

³Universität des Saarlandes, Postfach 151150, D-66041 Saarbrücken, Germany

⁴Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: maximo.a@mail.ru

Показаны особенности интерпретации эллипсометрических данных от ферромагнитных образцов при воздействии внешнего магнитного поля. Представлены аналитические выражения для коэффициентов Френеля с учетом магнитооптического параметра, входящего в недиагональные члены тензора диэлектрической проницаемости. Рассмотрены различные модели отражающих оптических систем при наличии магнитного поля в конфигурации магнитооптического экваториального эффекта Керра: модель однородной полубесконечной среды, однослойная модель, многослойная модель. Данные модели позволяют интерпретировать экспериментальные данные при эллипсометрических и магнитоэллипсометрических исследованиях слоистых магнитных наноструктур. Получена связь эллипсометрических параметров Ψ и Δ с пропорциональным намагниченности магнитооптическим параметром Q , впервые произведена оценка поправок $\delta\Psi$ и $\delta\Delta$ в эллипсометрические углы, обусловленных поверхностным экваториальным магнитооптическим эффектом Керра. Полученные результаты позволяют с помощью традиционной эллипсометрической аппаратуры измерять магнитные характеристики, такие как петли гистерезиса, коэрцитивную силу слоистых наноструктур.

Ключевые слова: магнитоэллипсометрия, эллипсометрические измерения, магнитооптический эффект Керра, тонкие пленки.

MAGNETIC CONTRIBUTION TO FRESNEL COEFFICIENTS AT MAGNETOELLIPSOMETRIC INVESTIGATION

O. A. Maximova^{1,2}, S. G. Ovchinnikov^{1,2}, U. Hartmann³, N. N. Kosyrev¹, S. N. Varnakov^{1,4}

¹Kirenskiy Institute of Physics of the SB RAS
50, bld. 38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

²Siberian Federal University,
79 Svobodnyy Prospect, Krasnoyarsk, 660041, Russia

³Saarland University,
Postfach 151150, D-66041 Saarbrücken, Germany

⁴Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia.

E-mail: maximo.a@mail.ru

The ellipsometric measurement features of the ferromagnetic samples under the influence of an external magnetic field are shown. The analytical expressions for the Fresnel coefficients are presented with regard to the magneto-optical parameter in the off-diagonal elements of the dielectric permittivity. The model of a homogeneous semi-infinite medium, one-layer model, and the multilayer model of the reflective optical systems in the presence of a magnetic field in the equatorial magneto-optical Kerr effect configuration are analyzed. These models permit to interpret the experimental data of the ellipsometric and magneto-ellipsometric studies of layered magnetic nanostructures.

*Работа выполнена при финансовой поддержке программы ОФН РАН № 2.4, программы Президиума РАН № 24.34, интеграционного проекта СО РАН – ДВО РАН № 85, гранта поддержки ведущей научной школы (проект НШ-1044.2012.2), «У.М.Н.И.К.» (Красноярск, Россия) и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Соглашение № 14.132.21.1709, Государственные контракты № 14.513.11.0016 и № 02.G25.31.0043, а также ФЦП «Кадры», Государственный контракт 16.740.11.0740.

For the first time the relationship of the ellipsometric parameters ψ and Δ with magneto-optical parameter Q is obtained, $\delta\psi$ and $\delta\Delta$ corrections in the ellipsometric angles are evaluated due to the equatorial surface magneto-optical Kerr effect. As a result, it becomes possible to measure the magnetic characteristics of the layered nanostructures, such as the hysteresis loop and coercivity with the conventional ellipsometric apparatus.

Keywords: magneto-optical ellipsometry, ellipsometric characterization, magneto-optical Kerr effect, thin films.

Синтез новых наноструктур с чередованием магнитных и немагнитных слоев чрезвычайно актуален в связи с бурным развитием нового направления электроники – спинтроники, основанном на спин-поляризованном электронном транспорте [1]. Это обуславливает актуальность разработки высокоточных и удобных в использовании методов контроля свойств получаемых структур. В контексте данной ситуации представляется перспективным развитие нового метода магнитоэллипсометрии, сочетающего в себе возможности классической эллипсометрии и измерения магнитооптического эффекта Керра.

Предлагаемый метод обладает несколькими явными преимуществами. Он обеспечивает возможность не только *ex situ* исследования оптических, структурных и магнитных свойств наноструктур, но и диагностики материалов в процессе их создания, а значит, позволяет синтезировать наноматериалы с управляемыми на атомном уровне составом, структурой и свойствами. При этом метод не изменяет свойств исследуемых объектов, является неразрушающим и обладает достаточной поверхностной чувствительностью. Магнитоэллипсометрия позволяет получать информацию также и о связи электронной структуры с магнитными свойствами исследуемого материала.

Однако, существует проблема интерпретации экспериментальных данных, особенно при магнитных измерениях, так как в этом случае требуется определенный математический аппарат, позволяющий по эллипсометрическим измерениям анализировать магнитные свойства образца. В этой связи, в данной работе была рассмотрена возможность в рамках одного эксперимента исследовать как оптические, так и магнитные свойства наноструктур.

1. Анализ основных отражающих моделей в случае проведения магнитоэллипсометрических измерений. Метод классической эллипсометрии основан на том, что при падении плоско поляризованной волны на исследуемый образец меняются ее поляризационные характеристики и после отражения волна становится в общем случае эллиптически поляризованной. В эксперименте измеряются эллипсометрические параметры ψ и Δ , на основе которых рассчитывается комплексный эллипсометрический параметр ρ [2], равный отношению комплексных коэффициентов отражения или пропускания для двух типов поляризации световой волны: в плоскости падения (индекс p) и перпендикулярно к ней (индекс s). Уравнение, связывающее экспериментальные данные и внешние параметры (угол падения света ϕ_0 , комплексный показатель преломления внешней среды N_0 , длину волны λ) с интересующими нас свойствами отражающей поверхности, влияющими на значение

коэффициентов отражения (распределением оптических постоянных в приповерхностных слоях, рельефом) получило название основного уравнения эллипсометрии [3]:

$$\rho = \operatorname{tg}\psi \exp(i\Delta) = \frac{R_p}{R_s}. \quad (1)$$

В случае проведения магнитоэллипсометрических измерений необходимо учитывать наличие магнитного поля при расчете коэффициентов отражения тонких пленок.

Изменение намагниченности исследуемой структуры приводит к изменениям эллипсометрических углов, благодаря вкладу экваториального магнитооптического эффекта Керра (экваториальная конфигурация рассматривается здесь как наиболее приемлемая с точки зрения экспериментальной реализации в условиях измерений *in situ*) в состояние поляризации. Экваториальный эффект Керра наблюдается при перпендикулярном расположении вектора намагниченности относительно плоскости падения и параллельно плоскости отражения [4] и состоит в изменении интенсивности и сдвиге фазы линейно-поляризованного света, отраженного ферромагнитным образцом [5]. В связи с этим требуется рассмотреть уравнения Максвелла для случая экваториального эффекта Керра в том диапазоне длин волн, на котором предполагается проводить измерения. В рамках данной работы мы будем рассматривать оптический видимый диапазон, поскольку большинство эллипсометров в настоящее время работают именно на этих частотах.

Ввиду того, что металлооптика формально совпадает с оптикой прозрачных тел при замене в волновых уравнениях величины действительной диэлектрической постоянной $\varepsilon = n^2$ на комплексную величину

$$\varepsilon = (n - ik)^2, \quad (2)$$

где n – показатель преломления; k – показатель поглощения [6], для описания магнитооптических эффектов в ферромагнетиках принято исходить из общих дифференциальных уравнений электромагнитного поля

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\operatorname{rot} \vec{E}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \operatorname{rot} \vec{H}, \quad (4)$$

и тензорного уравнения

$$\vec{D} = [\varepsilon] \vec{E}, \quad (5)$$

где $[\varepsilon]$ – тензор диэлектрической проницаемости намагниченного ферромагнитного металла.

Решение уравнений Максвелла в данном случае рассматривают в виде плоской неоднородной волны [6]. При этом целесообразно выбрать плоскость YX в качестве плоскости падения, YZ – в качестве граничной плоскости. В данной геометрии эффекта рассматриваются выражения для комплексной амплитуды электрического вектора падающей, отраженной и преломленной волн, с учетом показателей преломления соответствующих сред, и, соответственно, коэффициентов отражения.

Тензор диэлектрической проницаемости намагниченного ферромагнитного металла строится на основе вынужденной анизотропии и выглядит следующим образом [6]:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon & -i\varepsilon Q & 0 \\ i\varepsilon Q & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$ – комплексная диэлектрическая проницаемость среды; ε_1 – действительная часть диэлектрической проницаемости среды; $\varepsilon_2 = 4\pi\sigma/\omega$ – мнимая часть диэлектрической проницаемости среды; Q – магнитооптический параметр, зависящий от намагниченности тела; σ – удельная электропроводность; ω – циклическая частота. При намагниченности равной нулю, что означает равенство нулю магнитооптического параметра Q , недиагональные компоненты тензора обращаются в нуль.

При интерпретации результатов эллипсометрического эксперимента обычно используют три основные модели отражающих систем [2]: модель полубесконечной среды, однослойная модель и многослойная модель. Рассмотрим для этих моделей влияние намагниченности на состояние поляризации в случае экваториального магнитооптического эффекта Керра.

1.1. Модель полубесконечной среды в случае экваториального магнитооптического эффекта Керра. Необходимо рассмотреть обобщенные формулы Френеля для случая, когда электромагнитная волна падает из немагнитной диэлектрической среды, характеризующейся показателем преломления N_0 , на ферромагнитный металл с показателем преломления n .

В ходе вычислений становится очевидным, что колебания, параллельные силовым линиям (внутри ферромагнетика), совершенно отделяются от колебаний, перпендикулярных силовым линиям.

В привычных обозначениях эллипсометрии (φ_0 и φ_1 – углы падения и преломления света, измеряемые в плоскости падения света от нормали к отражающей поверхности) отношения амплитуд электрического вектора отраженной и падающей волн принимают вид:

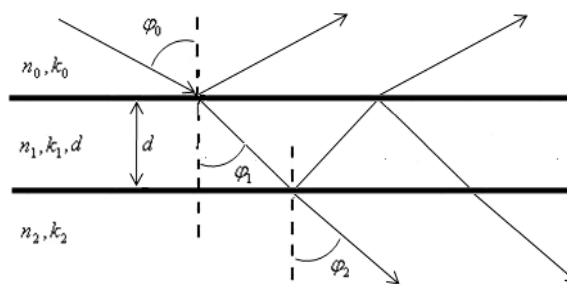
$$R_S = \frac{N_0 \cos \varphi_0 - n \cos \varphi_1}{N_0 \cos \varphi_0 + n \cos \varphi_1}, \quad (7)$$

$$R_p = \frac{n \cos \varphi_0 - N_0 \cos \varphi_1}{n \cos \varphi_0 + N_0 \cos \varphi_1} - i \frac{2QN_0^2 \sin \varphi_0 \cos \varphi_0}{(n \cos \varphi_0 + N_0 \cos \varphi_1)^2}. \quad (8)$$

Очевидно, что намагничивание не влияет на интенсивность отраженной s -компоненты света, т. е.

выражение для R_s определяется обычной формулой Френеля для немагнитных сред. Влияние намагниченности на отражение света выражается вторым слагаемым правой части формулы для R_p (8). При намагниченности равной нулю, Q также обращается в нуль (поскольку Q пропорционален намагниченности), и выражение (8) принимает вид формулы Френеля для немагнитного образца. Именно второе слагаемое отвечает за влияние магнитного поля на эллипсометрические характеристики материалов для модели однородной полубесконечной среды.

1.2. Однослойная модель в случае экваториального магнитооптического эффекта Керра. Пусть на среду 1 из среды 0 (причем внешняя среда 0 и полубесконечная подложка 2 – немагнитные диэлектрики, среда 1 – ферромагнитный металл толщины d) падает электромагнитная волна (рисунок 1) и расщепляется на каждой границе раздела на две: отраженную и прошедшую [2]. В результате образуется бесконечный ряд парциальных волн, амплитуды которых уменьшаются по геометрической прогрессии.



Однослойная модель

Комплексные амплитудные коэффициенты отражения R определяются с помощью формул для бесконечной геометрической прогрессии, используемых для сложения комплексных амплитуд последовательности парциальных волн, образующих результирующую отраженную волну в среде 0, и в случае экваториального эффекта Керра имеют вид:

$$R_p = r_{01p} + \frac{t_{01p}t_{10p}r_{12p} \exp(-i2\beta)}{1 - r_{10p}r_{12p} \exp(-i2\beta)}, \quad (9)$$

$$R_s = r_{01s} + \frac{t_{01s}t_{10s}r_{12s} \exp(-i2\beta)}{1 - r_{10s}r_{12s} \exp(-i2\beta)}. \quad (10)$$

где β – это фазовая толщина плёнки:

$$\beta = k\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} N_1 \cos \varphi_1 d, \quad (11)$$

где Δ – оптическая длина пути; k – волновое число.

Коэффициенты $r_{01s,p}$ и $r_{12s,p}$ в выражениях (9) и (10) – это коэффициенты отражения для границ раздела 0-1 и 1-2 соответственно. Именно о них шла речь выше при расчете модели полубесконечной среды, где они были обозначены заглавными буквами R , так как там они характеризовали всю структуру, а не одну

границу раздела из нескольких имеющихся, как это происходит в данном случае. Таким образом, коэффициенты $r_{01s,p}$ и $r_{12s,p}$ выглядят следующим образом:

$$r_{01p} = \frac{N_1 \cos \phi_0 - N_0 \cos \phi_1}{N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1} - i \frac{2QN_0^2 \sin \phi_0 \cos \phi_0}{(N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1)^2}, \quad (12)$$

$$r_{12p} = \frac{N_2 \cos \phi_1 - N_1 \cos \phi_2}{N_2 \cos \phi_1 + N_1 \cos \phi_2} - i \frac{2QN_1^2 \sin \phi_1 \cos \phi_1}{(N_2 \cos \phi_1 + N_1 \cos \phi_2)^2}, \quad (13)$$

$$r_{01s} = \frac{N_0 \cos \phi_0 - N_1 \cos \phi_1}{N_0 \cos \phi_0 + N_1 \cos \phi_1}, \quad (14)$$

$$r_{12s} = \frac{N_1 \cos \phi_1 - N_2 \cos \phi_2}{N_1 \cos \phi_1 + N_2 \cos \phi_2}. \quad (15)$$

Коэффициенты t_{01} и t_{10} в выражениях (9) и (10) – это коэффициенты пропускания, которые равны:

$$t_{01p} = \frac{2N_0 \cos \phi_0}{N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1} + i \frac{2QN_0^3 \sin \phi_0 \cos \phi_0}{N_1(N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1)^2}, \quad (16)$$

$$t_{01s} = \frac{2N_0 \cos \phi_0}{N_0 \cos \phi_0 + N_1 \cos \phi_1}. \quad (17)$$

Коэффициент t_{01} соответствует направлению распространения волны из среды 0 в среду 1, а t_{10} – соответственно, в обратном направлении.

При рассмотрении распространения волны в обратном направлении в случае модели структуры, состоящей из немагнитных сред, френелевские коэффициенты отражения и пропускания на границе 1-0 связаны с соответствующими коэффициентами на границе 0-1 соотношениями [2]:

$$r_{10} = -r_{01}, \quad (18)$$

$$t_{10} = (1 - r_{01}^2) / t_{01}, \quad (19)$$

В случае магнитооптического эффекта Керра выражения (18) и (19) действительны только для s-поляризации. Они позволяют упростить выражение (10):

$$R_s = \frac{r_{01s} + r_{12s} \exp(-i2\beta)}{1 + r_{01s}r_{12s} \exp(-i2\beta)}, \quad (20)$$

$$r_{10s} = \frac{N_1 \cos \phi_1 - N_0 \cos \phi_0}{N_1 \cos \phi_1 + N_0 \cos \phi_0}, \quad (21)$$

$$t_{10s} = \frac{2N_1 \cos \phi_1}{N_0 \cos \phi_0 + N_1 \cos \phi_1}. \quad (22)$$

Для p-поляризации из-за наличия второго слагаемого в R_p вид коэффициентов отражения несимметричен и не позволяет использовать упрощающие вид формул выражения, таким образом:

$$r_{10p} = \frac{N_0 \cos \phi_1 - N_1 \cos \phi_0}{N_0 \cos \phi_1 + N_1 \cos \phi_0} - i \frac{2QN_1^2 \sin \phi_1 \cos \phi_1}{(N_0 \cos \phi_1 + N_1 \cos \phi_0)^2}, \quad (23)$$

$$t_{10p} = \frac{2N_1 \cos \phi_1}{N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1} + i \frac{2QN_1^3 \sin \phi_1 \cos \phi_1}{N_0(N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1)^2}, \quad (24)$$

Углы ϕ_0 , ϕ_1 и ϕ_2 , фигурирующие в представленных выше формулах, связаны законом Снеллиуса.

Таким образом, получены основные формулы, необходимые для анализа данной модели: коэффициенты отражения всей структуры (9, 10) и коэффициенты отражения и пропускания, соответствующие границам раздела сред (12–17, 21–24). Также можно отметить, что магнитное поле вносит вклад в коэффициенты отражения только при p-поляризации падающей волны.

1.3. Многослойная модель в случае экваториально-го магнитооптического эффекта Керра. При диагностике свойств многослойных наноструктур широкое распространение получила модель, основанная на использовании матриц рассеяния [2], описывающих каждый отдельный слой и соответствующую границу раздела.

Матрица 2×2 рассеяния слоистой структуры $\hat{S}$ рассчитывается следующим образом:

$$\hat{S} = \hat{I}_{01} \hat{L}_1 \hat{I}_{12} \hat{L}_2 \dots \hat{I}_{(j-1)j} \hat{L}_j \dots \hat{L}_m \hat{I}_{m(m+1)}. \quad (25)$$

где $\hat{I}_m$ – матрицы рассеяния отдельных границ раздела; $\hat{L}_j$ – матрицы рассеяния отдельных слоев

Полный коэффициент отражения слоистой структуры для линейных поляризаций (p) и (s) равен:

$$R_p = \frac{S_{21p}}{S_{11p}}, \quad (26)$$

$$R_s = \frac{S_{21s}}{S_{11s}}. \quad (27)$$

В монографии [2] показано, что матрицы слоя $\hat{L}$ одинаковы для p- и s-поляризаций:

$$\hat{L}_p = \hat{L}_s = \begin{bmatrix} \exp(i\beta) & 0 \\ 0 & \exp(-i\beta) \end{bmatrix}, \quad (28)$$

где β – фазовая толщина слоя,

Однако, матрицы $\hat{S}_p$ и $\hat{S}_s$ не равны друг другу, так как матрицы границы раздела $\hat{I}$ различны для p- и s-поляризаций:

$$\hat{I}_{abp} = \frac{1}{t_{abp}} \begin{bmatrix} 1 & -r_{bap} \\ r_{abp} & t_{bap}t_{abp} - r_{abp}r_{bap} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$\hat{I}_{abs} = \frac{1}{t_{abs}} \begin{bmatrix} 1 & r_{abs} \\ r_{abs} & 1 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Экваториальный магнитооптический эффект Керра дает вклад только в коэффициенты отражения структур в случае p-поляризации, поскольку именно для неё у коэффициентов отражения и пропускания

(12–17, 21–24), соответствующих границам раздела сред, определяющих элементы матриц (29, 30), возникает второе слагаемое.

Таким образом, с помощью выражений (12–17, 21–30) можно рассчитать любую многослойную изотропную структуру, чередующиеся слои которой могут носить как немагнитный, так и ферромагнитный характер.

2. Связь эллипсометрических и магнитооптических данных. При наличии магнитного поля возникают некоторые изменения эллипсометрических параметров $\delta\psi$ и $\delta\Delta$. Запишем основное уравнение эллипсометрии (1) в виде:

$$\operatorname{tg}\psi \exp(i\Delta) = \frac{R_p(Q)}{R_s} = \frac{R'_p - iQ'_p}{R'_s - iQ'_s}, \quad (31)$$

где R'_p и R'_s – действительные части комплексных коэффициентов отражения для р- и s-поляризаций, Q'_p и Q'_s – мнимые части соответственно.

Выделим у коэффициентов отражения вклад, вносимый магнитным полем и обозначим его у мнимых частей Q'_{p1} и Q'_{s1} , у действительных R'_{p1} и R'_{s1} , немагнитные слагаемые обозначим R'_{p0} , R'_{s0} , Q'_{p0} и Q'_{s0} . Из выражений для коэффициентов отражения (7 и 8, 9 и 10, 26 и 27 для модели полубесконечной среды, однослойной модели и многослойной модели, соответственно) следует, что в случае экваториального магнитооптического эффекта Керра $\delta R_s = 0$, а $\delta R_p \neq 0$ – это второе слагаемое в R_p , откуда следует, что $Q'_{s1} = 0$, $R'_{s1} = 0$:

$$Q'_s = Q'_{s0} + Q'_{s1} = Q'_{s0}, \quad (32)$$

$$Q'_p = Q'_{p0} + Q'_{p1}. \quad (33)$$

$$R'_s = R'_{s0} + R'_{s1} = R'_{s0}, \quad (34)$$

$$R'_p = R'_{p0} + R'_{p1}. \quad (35)$$

Обозначим ψ_0 , Δ_0 эллипсометрические углы в отсутствие магнитного поля ($Q = 0$). Тогда при наличии магнитного поля ($Q \neq 0$) измеряемые эллипсометрические параметры будут равны $\psi = \psi_0 + \delta\psi$, $\Delta = \Delta_0 + \delta\Delta$. Выразим эллипсометрические параметры ψ , Δ и ψ_0 , Δ_0 через введенные в (31–35) обозначения. В результате получим, что значения возникающих при перемагничивании изменений эллипсометрических параметров $\delta\psi$ и $\delta\Delta$ равны:

$$\delta\psi = \psi - \psi_0 = \arctg(\sqrt{1 + A + B \operatorname{tg}(\psi_0)}) - \psi_0, \quad (36)$$

где

$$A = \frac{(Q'_{s0}Q'_{p1})^2 + (Q'_{p1}R'_{s0})^2 + 2Q'_{p0}Q'_{p1}(R'_{s0}{}^2 + Q'_{s0}{}^2)}{(R'_{p0}R'_{s0} + Q'_{p0}Q'_{s0})^2 + (Q'_{s0}R'_{p0} - Q'_{p0}R'_{s0})^2},$$

$$B = \frac{(R'_{p1}R'_{s0})^2 + (R'_{p1}Q'_{s0})^2 + 2R'_{p0}R'_{p1}(R'_{s0}{}^2 + Q'_{s0}{}^2)}{(R'_{p0}R'_{s0} + Q'_{p0}Q'_{s0})^2 + (Q'_{s0}R'_{p0} - Q'_{p0}R'_{s0})^2},$$

$$\delta\Delta = \Delta - \Delta_0 =$$

$$= \arctg \frac{Q'_{s0}(R'_{p0} + R'_{p1}) - (Q'_{p0} + Q'_{p1})R'_{s0}}{(R'_{p0} + R'_{p1})R'_{s0} + (Q'_{p0} + Q'_{p1})Q'_{s0}} -$$

$$- \arctg \frac{Q'_{s0}R'_{p0} - Q'_{p0}R'_{s0}}{R'_{p0}R'_{s0} + Q'_{p0}Q'_{s0}}. \quad (37)$$

Рассмотрим случай, когда вклад от магнетизма мал, то есть $Q'_{p1} \ll Q'_{p0}$, $R'_{p1} \ll R'_{p0}$. Тогда можно ввести два малых параметра $\alpha = Q'_{p1}/Q'_{p0}$ и $\beta = R'_{p1}/R'_{p0}$ и разложить по ним в ряд выражения для $\delta\psi$ и $\delta\Delta$:

$$\delta\psi = \frac{\operatorname{tg}\psi_0 Q'_{p0}{}^2}{(R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2)(1 + \operatorname{tg}^2\psi_0)} \alpha +$$

$$+ \frac{\operatorname{tg}\psi_0 R'_{p0}{}^2}{(R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2)(1 + \operatorname{tg}^2\psi_0)} \beta +$$

$$+ \frac{\alpha^2 \operatorname{tg}\psi_0 Q'_{p0}{}^2 (R'_{p0}{}^2 + \operatorname{tg}^2\psi_0 (R'_{p0}{}^2 - 2Q'_{p0}{}^2))}{2 (R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2)^2 (1 + \operatorname{tg}^2\psi_0)^2} +$$

$$+ \frac{\beta^2 \operatorname{tg}\psi_0 R'_{p0}{}^2 (Q'_{p0}{}^2 + \operatorname{tg}^2\psi_0 (Q'_{p0}{}^2 - 2R'_{p0}{}^2))}{2 (R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2)^2 (1 + \operatorname{tg}^2\psi_0)^2} +$$

$$+ \alpha\beta \frac{\operatorname{tg}\psi_0 Q'_{p0}{}^2 R'_{p0}{}^2 (1 + 3 \operatorname{tg}^2\psi_0)}{(R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2)^2 (1 + \operatorname{tg}^2\psi_0)^2}. \quad (38)$$

$$\delta\Delta = -\alpha \frac{R'_{p0}Q'_{p0}}{R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2} + \beta \frac{R'_{p0}Q'_{p0}}{R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2} + \alpha^2 \frac{R'_{p0}Q'_{p0}{}^3}{(R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2)^2} -$$

$$- \beta^2 \frac{Q'_{p0}R'_{p0}{}^3}{(R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2)^2} + \alpha\beta \frac{Q'_{p0}R'_{p0}(R'_{p0}{}^2 - Q'_{p0}{}^2)}{(R'_{p0}{}^2 + Q'_{p0}{}^2)^2}. \quad (39)$$

Очевидно, что в нулевом приближении параметры $\delta\psi$ и $\delta\Delta$ равны нулю. В первом приближении наблюдается пропорциональность $\delta\psi$ и $\delta\Delta$ первой степени магнитооптического параметра Q . При рассмотрении разложения с учетом второй степени по α и β в $\delta\Delta$, как и в $\delta\psi$, возникают слагаемые, пропорциональные квадрату Q . Линейная зависимость магнитооптического параметра Q , а, следовательно, и всех линейных магнитооптических эффектов, от намагнитченности образца позволяет использовать эти эффекты для измерения петель гистерезиса и кривых намагничивания.

Таким образом, предложена методика интерпретации магнитоэллипсометрических измерений с использованием моделей отражающих слоистых магнитных структур в геометрии экваториального магнитооптического эффекта Керра. Аналитически были получены выражения, связывающие классическую эллипсометрию и магнитооптику, выделен вклад, вносимый ненулевой намагнитченностью исследуемой структуры. Впервые получены поправки $\delta\psi$ и $\delta\Delta$ в эллипсометрические углы ψ и Δ , возникающие при воздействии на образец внешним магнитным полем.

Библиографические ссылки

1. Yihong Wu. Nano spintronics for data storage // Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology / ed. Nalva S. H. ACP, USA, 2004. Vol. 10. P. 1–50.
2. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. С. 311–414.
3. Шве́ц В. А. Эллипсометрия: учеб. пособие для студентов старших курсов физического факультета

НГУ / В. А. Швец. Новосибирск : Издательство НГУ. 2002.

4. Керра эффект – Энциклопедия физики и техники [Электронный ресурс]. URL: http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1597.html. (дата обращения: 07.11.2011).

5. Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1976. 367 с.

6. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит.-ры, 1961.

References

1. Yihong Wu. Nano spintronics for data storage. *Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology*. Ed. Nalva S. H. ACP, USA, 2004, vol. 10, p. 1–50.

2. Azzam R., Bashara N. *Jellipsometrija i poljarizovannyj svet* (Ellipsometry and polarized light). Moscow, Mir, 1981, p. 311–414.

3. Shvets V. A. *Ellipsometriya. Uchebnoe posobie dlya studentov starshikh kursov fizicheskogo fakul'teta NGU* (Ellipsometry. Study guide for senior students of the Physics department of Novosibirsk state university). Novosibirsk, Izdatel'stvo NGU, 2002.

4. *The Kerr effect – encyclopedia of physics and technology*. Available at: http://www.femto.com.ua/articles/part_1/1597.html. (accessed 07.11.2011).

5. Krinchik G. S. *Fizika magnitnyh javlenij* (Physics of Magnetic Phenomena). Moscow, MSU, 1976.

6. Sokolov A. V. *Opticheskie svoystva metallov* (Optical Properties of Metals). Moscow, GIFML, 1961.

© Максимова О. А., Овчинников С. Г., Hartmann U., Косырев Н. Н., Варнаков С. Н., 2013

УДК 629.78.002.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ*

А. Е. Михеев^{1,2}, А. В. Гирн^{1,2}, С. С. Ивасев¹, И. В. Евкин³

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

²Институт физики им. Л. В. Киренского, Сибирское отделение Российской академии наук Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50, стр. 38

³ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» Россия, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

Получены образцы покрытий микродуговым окислением (МДО) на алюминиевой фольге для защиты элементов космического аппарата (КА) от воздействия стационарных плазменных двигателей (СПД). Выявлены оптимальные режимы обработки, проведены исследования структуры и свойств, защитных покрытий, нанесенных микродуговым окислением. Проведены исследования МДО покрытий на воздействие факторов хранения и эксплуатации, измерения терморадационных характеристик, электрического сопротивления и испытания на эрозионную стойкость. Приведено описание экспериментальной установки по определению воздействия плазмы на эрозионную стойкость МДО покрытий. Исследования показали, что характеристики покрытий, полученные методом МДО, удовлетворяют требованиям и могут быть использованы в качестве защитных покрытий космических аппаратов.

Ключевые слова: космический аппарат, антиэрозионные покрытия, микродуговое окисление, плазма стационарных плазменных двигателей.

INVESTIGATION OF THE SPACE VEHICLES COATINGS FEATURES

A. E. Miheev^{1,2}, A. V. Girn^{1,2}, S. S. Ivasev¹, I. V. Evkin²

¹Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev 31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: michla@mail.ru

²Kirenskiy Institute of Physics of the SB RAS

50, building 38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia

³JSC "Information Satellite Systems" named after Academician M. F. Reshetnev 52 Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russia. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

Samples of micro-arc oxidation coatings (MAO) on aluminum foil for the protection of the elements of spacecrafts (SC) against the stationary plasma thrusters (SPT) were obtained.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, государственные контракты № 14.513.11.0024 и № 02.G25.31.0043.

The optimal treatment regimens were revealed, the investigations of the structure and properties of the protective coatings applied by micro-arc oxidation were carried out along with the investigations of MAO coatings for the impact factors of storage and use, measurements of the thermo-radiation characteristics of the electric resistance and erosion resistance test. The description of the experimental plant for determination of the plasma effects on the erosion resistance of MAO coatings is presented. The studies showed that the properties of coatings obtained by MAO satisfy the requirements and can be used as protective coatings for spacecrafts.

Keywords: spacecraft, anti-erosion coatings, microarc oxidation, coding, plasma of the stationary plasma thrusters.

Для обеспечения функционирования космического аппарата (КА) в течение всего срока активного существования (САС) изделия необходимо, чтобы деградация ряда параметров аппаратуры и систем в процессе эксплуатации не приводила к нарушению его целевого использования [1–3].

Ужесточение требований по массе, энерговооруженности, и повышение требований к ресурсу и надежности КА приводят к уплотнению его компоновочной схемы. Как следствие, возрастает эрозионное воздействие СПД, используемых в качестве двигателей коррекции, на материалы конструкции КА. Обострение конкуренции на рынке космической техники вызывает необходимость в разработке новых и модернизации существующих защитных покрытий с требуемыми характеристиками.

Эрозионное воздействие плазменных струй СПД заключающееся в уносе материала конструкции, в результате длительной бомбардировки ионами газа, приводит к загрязнению внешних поверхностей КА продуктами распыления. Основной характеристикой данного вида воздействия является глубина эрозии, т.е. толщина распыленного слоя.

Предварительная оценка эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы, генерируемой стационарными плазменными двигателями, на поверхности панелей солнечных батарей и терморегулирующих покрытий (ТРП) радиатора системы терморегулирования (СТР) КА показала, что данное воздействие может оказать существенное дестабилизирующее воздействие на функционирование КА [1].

Предварительная оценка уровня эрозии углепластика КМУ-4, из которого состоит штанги и каркас БС, составляет от 103,5 до 827,6 мкм при длительности работы СПД 4500 часов. Максимальный уровень загрязнения. ТРП радиатора СТР продуктами эрозии панелей БС $1,5 \cdot 10^{-3}$ г/см². Полученное значение деградации коэффициента поглощения солнечной радиации ΔA_s ТРП радиатора СТР вследствие загрязнения продуктами эрозии панелей БС равно 0,12 недопустимо высоко, так как допускаемое значение деградации коэффициента поглощения ΔA_s ТРП радиатора СТР платформы «Экспресс-1000Н» от воздействия всех факторов составляет 0,16.

Еще одно негативное воздействие плазменных струй СПД проявляется с эрозией электропроводящего слоя (ПЭП) с терморегулирующих покрытий КА, что приводит к накоплению статического заряда и возникновению электропробоев на поверхности КА.

При этом решить проблему эрозионного воздействия плазмы СПД на материалы элементов конструк-

ции КА с помощью разуплотнения компоновочной схемы КА невозможно в связи с ужесточением требований по массе и энерговооруженности КА.

Таким образом, с целью повышения качества изготовления изделий космической техники необходимы разработка и применение на критичных поверхностях КА покрытий с повышенной стойкостью к эрозионному воздействию плазмы СПД.

Проведенный предварительный анализ показал, что к веществам, обладающим наибольшей стойкостью к воздействию струи плазмы инертных газов (аргона, ксенона), относится оксид алюминия (Al_2O_3) [2]. Оценочные расчеты показывают, что необходимая толщина защитного покрытия из Al_2O_3 должна быть не менее 33 мкм.

В данной работе предлагается защищать элементы конструкции КА, попадающие под действие плазмы СПД, тонкой (до 100 мкм) алюминиевой фольгой с антиэрозионным покрытием из оксида алюминия, нанесенного микродуговым оксидированием (МДО), что приемлемо по весовым характеристикам [3–5].

Нанесение покрытий на фольгу проводилось на установке ИАТ-Т, источник питания которой позволяет осуществлять независимую регулировку анодной и катодной составляющих тока, и одновременно стабилизировать средние величины этих токов, что существенно упрощает проведение процесса МДО и ведет к улучшению качества получаемых покрытий. Источник имеет следующие технические характеристики: диапазон регулируемых напряжений – (0–800) В; диапазон регулируемых токов – (0–120) А/дм²; погрешность стабилизации тока до 5 %.

В качестве подложки использовались образцы фольги АД размерами 160x130 мм и толщиной 100 мкм. Микродуговое оксидирование образцов проводили в слабощелочных водных электролитах следующих составов: № 1 – NaOH (5 г/л) + Na₂SiO₃ (10 г/л); № 2 – KOH (5 г/л) + Na₂SiO₃ (10 г/л).

Покрытия формировали при различных соотношениях I_k / I_a (от 0,6 до 1,4), плотностях тока (в диапазоне от 10 до 40 А/дм²), продолжительности обработки составляла 10–60 мин. Толщину покрытий контролировали толщиномером ТТ260 и на поперечных шлифах при помощи оптического микроскопа. Микроструктуру защитного покрытия нанесенного МДО изучали с использованием металлографического исследовательского комплекса SIAM на базе оптического микроскопа ЛабоМет И2.

Металлографический анализ показал, что покрытие состоит из двух слоев:

1) внешнего пористого слоя, состоящего из смеси оксидов $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$;

2) твердого слоя, примыкающего к металлу и содержащего, преимущественно оксид алюминия двух модификаций $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Зависимость толщины плотного слоя покрытия ($h_{пл}$) от плотности тока представлена на рис. 1. Общая толщина покрытия складывается из толщины твердого (внутреннего) и наружного слоев, причем, при высоких значениях плотности тока закономерно соотношение: $h_m / h_{общ} = (0,5 \div 0,6)$.

С ростом плотности тока наблюдается увеличение твердости оксидного слоя защитных покрытий. Увеличение твердости покрытий с ростом плотности тока происходит за счет повышения содержания модификации $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в покрытии, что подтверждает график изменения количественного соотношения фазовых составляющих покрытия, представленный на рис. 2.

Выявлено что оптимальными режимами получения защитных покрытий являются режимы обработки в электролите № 1, при высоких плотностях тока (более 20 А/дм^2), и соотношении анодной и катодной составляющей тока менее 1. Оптимальное время обработки от 30 до 45 мин. Результаты исследований по оптимизации технологических параметров приведены на рис. 3–4.

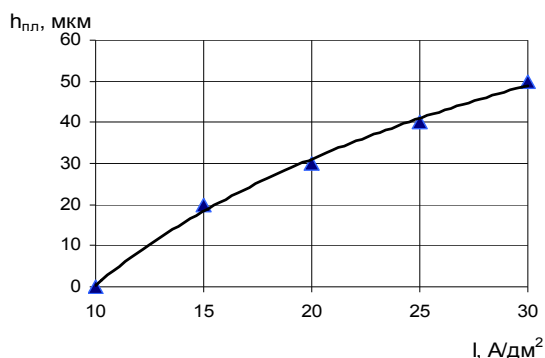


Рис. 1. Зависимость толщины плотного слоя покрытия из фольги А99 от плотности тока при соотношении $I_k / I_a = 1,3$

Для проведения испытаний защитных покрытий на воздействие факторов хранения и эксплуатации были изготовлены образцы защитного покрытия на алюминиевой фольге АД по ГОСТ 4784–74 с МДО размера-ми $100 \times 100 \text{ мм}$.

Покрытия подверглись следующим видам испытаний:

- циклическому сгибанию на диаметре 20 мм;
- ускоренным климатическим испытаниям (УКИ);
- радиационному воздействию;
- термоциклированию.

Перед УКИ образцы защитных покрытий были подвергнуты циклическому сгибанию по боковой поверхности цилиндра, диаметром 20 мм и последующему разгибанию в плоскость. Количество циклов 50. Внешний вид покрытий после воздействия не изменился.

Измерение терморadiационных коэффициентов поглощения солнечной радиации As и степени черноты En проводилось в соответствии с ОСТ92-0909–69. Измерение коэффициента As проводилось фотометром ФМ-59М, коэффициента En – терморadiометром ТРМ-И. В качестве образца сравнения при измерении коэффициента As защитного покрытия с МДО использовали образец АД с анодным оксидированием, $As = 0,47$.

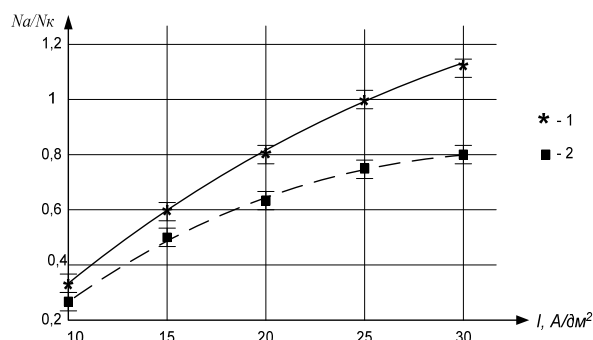


Рис. 2. Зависимость количественного соотношения N_α и N_γ фазовых составляющих Al_2O_3 покрытия от плотности тока

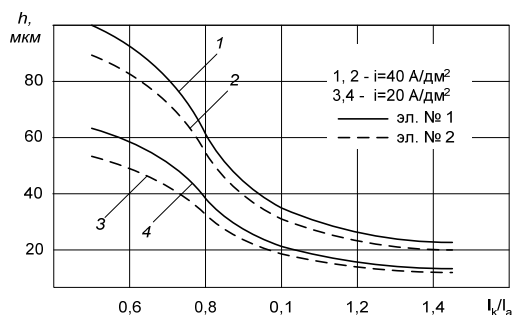


Рис. 3. Изменение толщины МДО-покрытия в зависимости от соотношения катодной и анодной составляющей токов (время обработки $t = 30 \text{ мин}$)

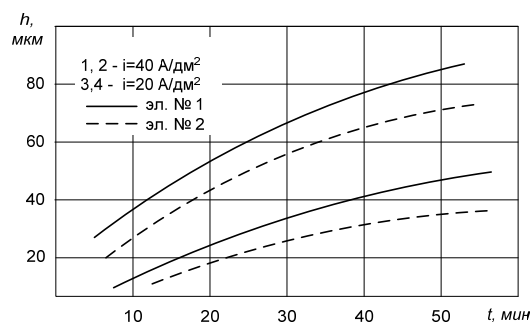


Рис. 4. Изменение толщины МДО-покрытия в зависимости от времени обработки при $I_k / I_a = 0,8$

Измерение поверхностного сопротивления проводилось на тераомметре Е6-13А с использованием электрода из резины, обернутого оловянной фольгой. Толщина фольги 0,02 мм. Площадь электрода 20×20 мм. Давление на образец при измерении 100 г/см², напряжение 100 В. Погрешность измерения не более 5 %.

Осмотр внешнего вида образцов проводился визуально. При визуальном осмотре контролировалось наличие трещин, отслоений покрытия, сохранение цвета.

Результаты измерения характеристик образцов показали, что A_s образцов с покрытием составляет 0,53–0,36 и зависит от режимов обработки, E_p – составляет от 0,8–0,33. Отношение A_s/E_p составляет более 0,5, что соответствует требованиям, предъявляемым к материалам для КА.

Сопротивление поверхности составляет $7,1 \cdot 10^7$ – $8,6 \cdot 10^7$, 1 Ом/Г. Внешний вид образцов после испытаний не изменился.

Испытания на радиационное воздействие проводились на электронном ускорителе ЭЛУ-4 в НИИ интроскопии. Образцы облучались электронами в среде азота до поглощенной дозы $6 \cdot 10^8$ рад. Средняя энергия электронов в плоскости размещения образцов – 4 МэВ, средняя плотность потока электронов $4,2 \cdot 10^{10}$ см⁻²с⁻¹.

Испытание на воздействие термоциклов проводилось в вакуумной камере УКГ-1000, при остаточном давлении не более $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Образцы располагались на термостоле, сверху закрывались ЭВТИ. Нагрев и охлаждение осуществлялись за счет теплового контакта и радиационного излучения с поверхности термостола. Нагрев термостола осуществлялся лампами типа КГ-127-1000, а охлаждение жидким азотом. Скорость нагрева-охлаждения составляла от 5

до 10 градусов в минуту. Излучение от ламп на поверхность образцов не попадало. Температура контролировалась с помощью датчиков температуры типа «термометры платиновые ТП 018-03». Выдержка при крайних температурах в течение 10 минут. Термоциклирование проводилось в диапазоне температур от –150 °С до +170 °С в количестве 100 циклов.

Образцы защитных покрытий из алюминиевой фольги АД по ГОСТ 4784–74 с оксидным слоем, нанесенным МДО выдержали испытания на воздействие радиации дозой $6 \cdot 10^8$ рад и последующего воздействия 100 термоциклов в вакууме в диапазоне температур от минус 150 до 170 °С.

Для испытания МДО покрытия на стойкость к воздействию СПД была разработана испытательная установка имитационной аргоновой плазмы на базе вакуумной камеры «Булат», которая позволяет при испытаниях сравнивать характеристики стойкости материалов к воздействию плазмы и получить предварительную оценку распыления материалов, выбрать из них наиболее стойкие, рекомендовать их на КА.

Испытания проводили на вакуумной установке, оснащенной ионным источником, позволяющим получать плазму ионов аргона (ксенона) с энергией до 300 эВ и системой контроля параметров плазмы в заданном энергетическом диапазоне.

Эксперимент по определению влияния плазмы на оптические свойства и эрозионную стойкость материалов проводили на испытательном стенде, оснащенной устройством ионной обработки УТП.ПД-150-014 и системой измерения параметров плазмы СИПП Semion™. Общий вид установки «Булат» представлен на рис. 5.

Технические характеристики УТП.ПД-150-014 представлены в табл. 1.

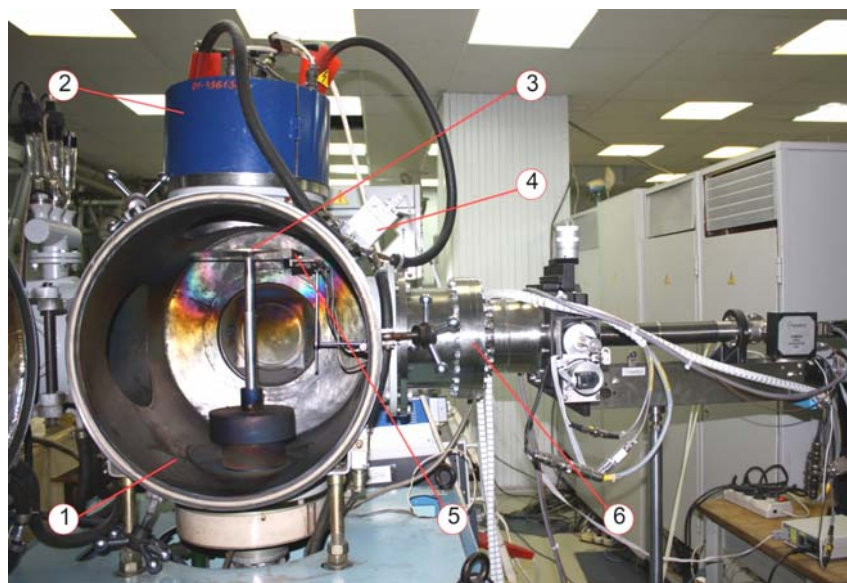


Рис. 5. Общий вид установки «Булат»:

1 – вакуумная камера «Булат»; 2 – ионный источник; 3 – стол с образцами; 4 – система запуска газа РРГ-12; 5 – зонды СИПП; 6 – система перемещения зондов

Технические характеристики УТП.ПД-150-014

№	Характеристика	Значение
1	Ток на электромагните	2,5 А
2	Плотность тока ионов (паспортное значение)	0,5...2 мА/см ²
3	Средняя энергия ионов (паспортное значение)	0,2...0,5 кэВ
4	Ускоряющее напряжение	600...4000В

На первом этапе эксперимента проводили измерение плотности ионного тока и энергии ионов по нескольким точкам пучка плазмы на расстоянии 120 мм от источника при нормальном падении ионов. При этом ускоряющее напряжение на источнике изменяли от 600 до 4000 В. По результатам измерений определяли равномерность пучка плазмы, энергетическое распределение ионов струи плазмы, и зависимость ионного тока плазмы УТП.ПД-150-014 при различном ускоряющем напряжении и выбирали режим работы ионного источника наиболее близкие по энергетическим характеристикам плазмы к параметрам плазмы СПД М100, работающего на ксеноне: энергия ионов Хе⁺ при нормальном угле падения ионов на расстоянии 1 м от среза сопла до 250 эВ, плотность ионного тока до 1,7 мА/см².

Испытания по определению эрозионного воздействия плазмы на образцы материалов проводили по выбранному режиму работы ионного источника на первом этапе. Для оценки деструктивного воздействия плазмы двигателей коррекции проводили эксперименты, позволяющие определить влияние плазмы на оптические свойства и эрозионную стойкость таких материалов как:

- полиимидная пленка, используемая как внешний слой экранно-вакуумной теплоизоляции;
- алюминиевая фольга АД1 с односторонним микродуговым оксидированием поверхности как вариант покрытия, обладающего высокой эрозионной стойкостью. Общей идеей эксперимента является облучение образцов в течение заданного времени при контролируемых параметрах плазмы и определение на соответствующих измерительных приборах требуемых физических характеристик до и после воздействия плазмы. Время экспозиции образцов: 30, 60, 120 минут.

Для всех образцов рассчитывали относительное и прямое изменение массы в процессе испытаний путем взвешивания до и после воздействия плазмы на прецизионных электронных весах типа HR-202 с дальнейшим расчетом коэффициента распыления, методика расчета которого приведена ниже.

Расчет прямого (ΔM) и относительного изменения массы (ПМ) по следующим формулам:

$$\Delta M = M'_{\text{обр}} - M''_{\text{обр}} \quad (1)$$

$$\text{ПМ} = \frac{M'_{\text{обр}} - M''_{\text{обр}}}{M'_{\text{обр}}} \times 100 \% \quad (2)$$

где $M'_{\text{обр}}$ – масса образца до испытаний, г; $M''_{\text{обр}}$ – масса образца после испытания, г.

Далее проводили оценку коэффициента распыления исследуемых материалов, который определяется как отношение равное числу выбитых атомов, приходящихся на один ион (атом/ион):

$$K = \frac{A}{I} \quad (3)$$

Количество атомов можно найти по формуле:

$$A = \frac{\Delta M}{m_{\text{а.е.м}} \cdot \mu} \quad (4)$$

где ΔM – разница массы образца до и после испытания, г; $m_{\text{а.е.м}}$ – атомная единица массы, равная $1,6597 \cdot 10^{-24}$ г; μ – молекулярная масса молекул распыляемого вещества. для покрытия МДО (Al_2O_3) – 102, для полиимидной пленки – 12.

Количество ионов можно найти по формуле:

$$I = (n\nu) \cdot S \cdot t, \quad (5)$$

где $(n\nu)$ – плотность потока ионов в месте расположения образца; S – площадь образца, см²; t – суммарное время воздействия струи плазмы на образец, с.

Таким образом коэффициент распыления образцов находим по формуле:

$$K = \frac{\Delta M}{(n\nu) \cdot m_{\text{а.е.м}} \cdot \mu \cdot S \cdot t} \quad (6)$$

Плотность потока ионов $(n\nu)$ и поверхностная плотность ионного тока J связаны соотношением:

$$(n\nu) = J / e, \quad (7)$$

где J – плотность ионного тока, А/см²; e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ К.

Дополнительно проводили оценку плотности теплового потока, создаваемого плазменной струей по следующей формуле:

$$Q = J \cdot U, \quad (8)$$

где J – плотность ионного тока, измеренная плоским зондом СИПП, А/см²; U – разрядное напряжение ионного источника, В.

Влияние плазмы на полиимидную пленку определяли по глубине эрозии измеряя толщину образцов до и после испытаний контактным способом с использованием индикатора многооборотного с ценой деления 2 мк. Изменение оптических свойств определяли по изменению спектрального коэффициента пропускания образцов в диапазоне длин волн от 250 до 2500 нм.

Для образцов алюминиевой фольги с МДО измеряли коэффициенты поглощения солнечной радиации A_s и степень черноты E_n до и после испытаний на приборах ТРМ-И и ФМ-59 со стороны распыляемой поверхности.

Контроль изменения толщины слоя МДО проводили с использованием прибора измерения геометрических параметров многофункционального Константа-К5 методом вихревых токов.

При проведении испытаний сравнивали стойкость трех материалов: алюминиевой фольги (алюминий покрывает покрывает большинство поверхностей КА) полиимидной пленки (которая в настоящее время используется для в качестве защитного покрытия от воздействия плазмы СПД) и алюминиевых образцов с МДО покрытием.

Режимы испытания в камере «Булат»: ток на катушке соленоида – 2,5 А, напряжение на аноде – в пределах 800 В, ток разряда – 15мА. Расчетное значение плотности теплового потока, создаваемого плазменной струей ионного источника, составила 0,008 Вт/см².

Расстояние от столика с образцами до генератора плазмы равно 150 мм. Угол падения ионов на поверхности образцов – около 90°. Длительность обработки – 60 мин.

До и после воздействия пучком ионов на образцы производилось взвешивание образцов на прецизионных электронных весах HR-202, а также измерение толщины контактным способом с использованием многооборотного индикатора. Толщину образцов измеряли в нескольких точках, затем вычисляли среднее значение. Процентное значение изменения массы образца в результате распыления плазмой рассчитывали по формуле:

$$\Delta M = \frac{M_{\text{до}} - M_{\text{после}}}{M_{\text{до}}} 100 \%$$

где $M_{\text{до}}$ – масса образца покрытия до испытаний, г; $M_{\text{после}}$ – масса образца покрытия после испытания, г.

Полученные экспериментальные данные по изменению массы и толщины исследуемых образцов сведены в табл. 2 и 3.

На рис. 6–8 показаны поверхности образцов МДО в исходном состоянии и после воздействия плазмы снятых с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6380.

Таблица 2

Изменение массы образцов до и после испытания

Образцы		Масса образцов, г		Изменение, г ($M_{\text{до}} - M_{\text{после}}$)	ΔM , %
		$M_{\text{до}}$	$M_{\text{после}}$		
ПМ	1	0,22837	0,22679	0,00158	0,692
	2	0,23180	0,23021	0,00159	0,686
	3	0,23860	0,23713	0,00147	0,616
	4	0,23080	0,22951	0,00129	0,559
Среднее значение				0,00148	0,638
МДО	1	0,42791	0,42728	0,00063	0,147
	2	0,42808	0,42751	0,00057	0,133
	3	0,46758	0,46683	0,00075	0,160
	4	0,45192	0,45072	0,00120	0,265
Среднее значение				0,00079	0,177
АД1	1	0,41936	0,41904	0,00032	0,076
	2	0,42135	0,42104	0,00031	0,073
	3	0,42358	0,42329	0,00029	0,068
	4	0,42582	0,42552	0,00030	0,070
Среднее значение				0,00031	0,072

Таблица 3

Изменение толщины образцов до и после испытания

Образцы		Толщина образцов, мм		Изменение ($T_{\text{до}} - T_{\text{после}}$), мм
		$T_{\text{до}}$	$T_{\text{после}}$	
ПМ	1	0,097	0,096	0,001
	2	0,105	0,098	0,007
	3	0,103	0,099	0,004
	4	0,100	0,097	0,003
Среднее значение				0,00375
МДО	1	0,100	0,099	0,001
	2	0,100	0,099	0,001
	3	0,125	0,125	0
	4	0,111	0,110	0,001
Среднее значение				0,00075
АД1	1	0,096	0,095	0,001
	2	0,096	0,095	0,001
	3	0,096	0,092	0,004
	4	0,096	0,094	0,002
Среднее значение				0,002

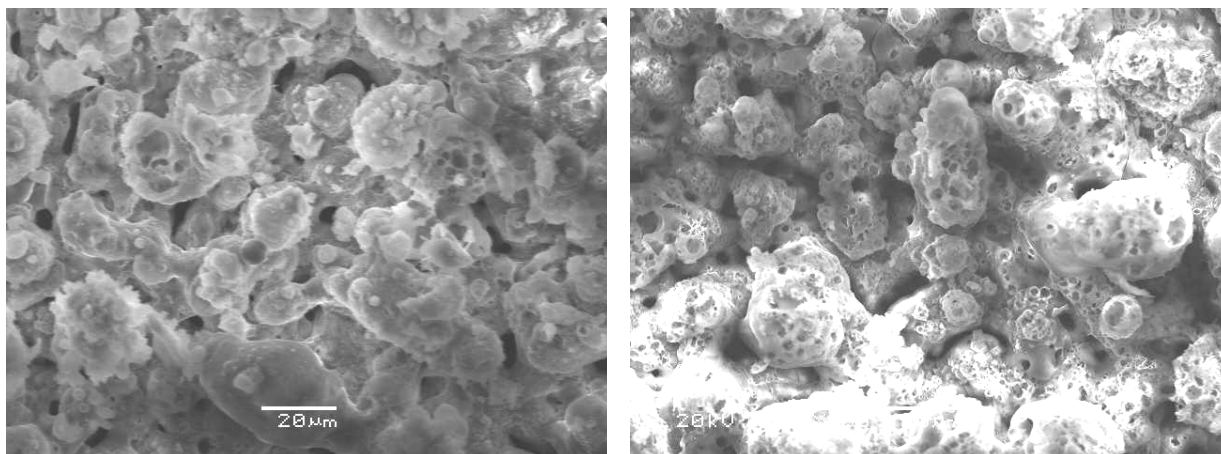


Рис. 6. Покрытие МДО снятое с увеличением 800 раз (Образец № 2)

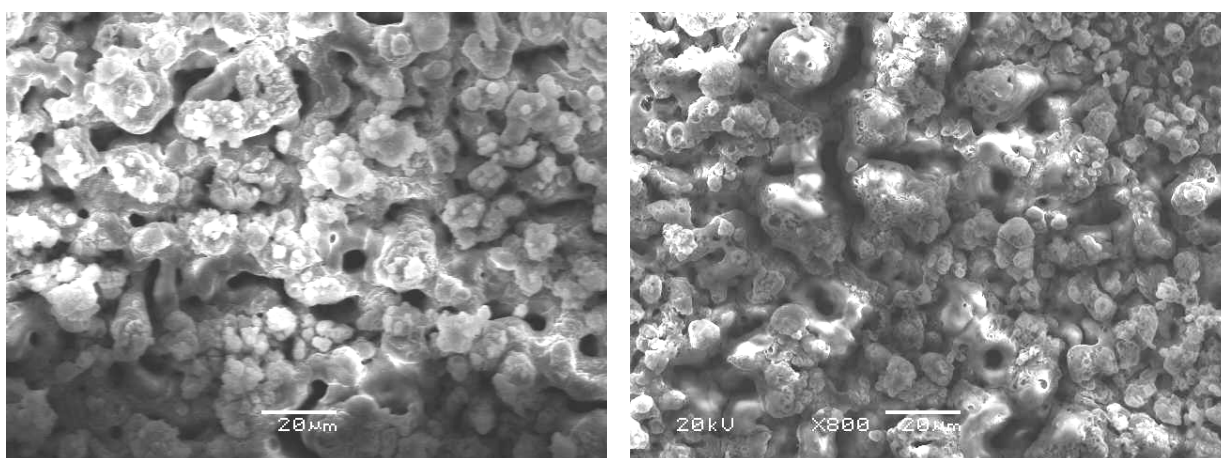


Рис. 7. Покрытие МДО снятое с увеличением 800 раз (Образец № 4)

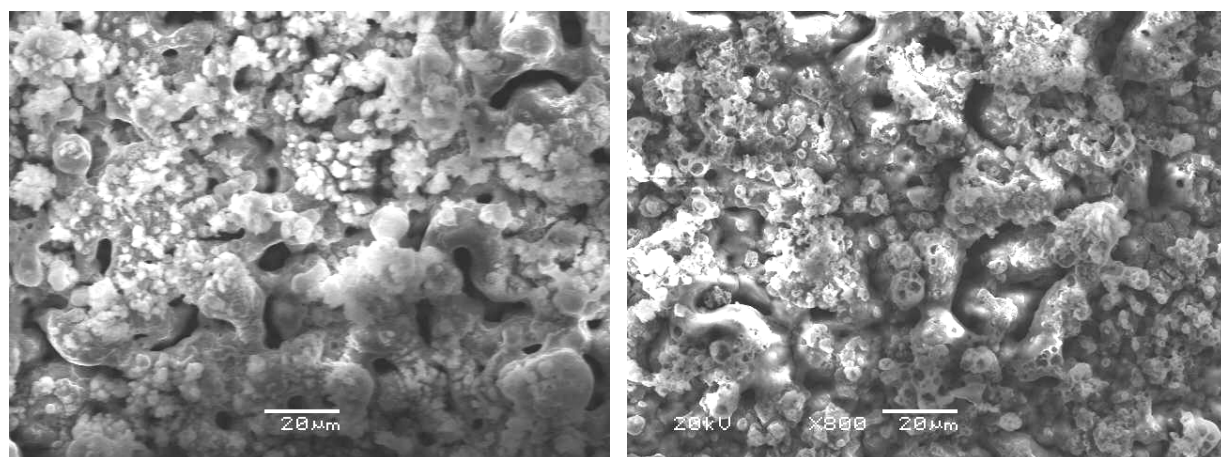


Рис. 8. Покрытие МДО снятое с увеличением 800 раз (Образец № 7)

После воздействия плазмы у образцов алюминиевой фольги с микродуговым оксидированием поверхности внешний вид остался без изменений. Максимально изменились масса и толщина у образцов полиимидной пленки. Образцы МДО потеряли массу большую, чем образцы алюминиевой фольги, это

можно объяснить некоторой гигроскопичностью МДО покрытий.

Толщина покрытий практически не изменилась. Исследования показали, что покрытия полученные методом МДО, могут быть использованы в качестве защитных покрытий на КА.

Библиографические ссылки

1. Исследование загрязняющего воздействия собственной внешней атмосферы и плазмы стационарных плазменных двигателей на космическом аппарате «Экспресс-АМ» / В. А. Смирнов, А. Б. Надирадзе и др. // Вестник СибГАУ. 2006. № 2 (10). С 46–50.
2. Технология тонких пленок (справочник) / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга ; пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. Т. 1. М. : Сов. радио, 1977.
3. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов и др. М. : ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
4. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А. Е. Михеев, В. В. Стацера и др. // Вестник машиностроения. 2003. № 2. С. 56–63.
5. Технология нанесения антиэрозионных покрытий на элементы конструкций космических аппаратов

/ А. В. Михеев, А. В. Гирн и др. // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С 130–134.

References

1. Smirnov V. A., Nadiradze A. B. et al. *Vestnik SibGAU*, 2006, 2 (10), p. 46–50.
2. *Tehnologija tonkih plenok (spravochnik)* (The technology of thin films (NTP), ed. L. Majssela, R. Gljenga, from English. ed. M. I. Elinsona, G. G. Smolko, vol. 1. Moscow, Sov. radio, 1977.
3. Suminov I. V. et al. *Mikrodugovoe oksidirovanie (teorija, tehnologija, oborudovanie)* (Microarc oxidation (the theory, technology, equipment). Moscow, JeKOMET, 2005, 368 p.
4. Miheev A. E., Stacura V. V. et al. *Vestnik mashinostroenija*. Moscow, 2003, № 2, p. 56–63.
5. Miheev A. V., Girn A. V. et al. *Vestnik SibGAU*, 2010, 4 (30), p. 130–134.

© Михеев А. Е., Гирн А. В., Ивасев С. С., Евкин И. В., 2013

УДК 548.736.5

СИНТЕЗ, СТРУКТУРА, ЭПР СПЕКТРЫ И ТЕПЛОЕМКОСТЬ КУБИЧЕСКОГО ОКСИФТОРИДА $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ *

М. С. Молокеев, Э. А. Петраковская, В. С. Бондарев, Е. М. Колесникова, Н. А. Иванов

Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50, стр. 38. E-mail: msmolokeev@mail.ru

Оксифторид $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ получен методом твердофазного синтеза. Установлено, что кристалл изоструктурен пиррохлору и уточнена его кристаллическая структура при $T = 298$ К методом Ритвельда. Несмотря на то, что основным структурным элементом в этом соединении является искаженный полиэдр, реализовалась кубическая фаза. Стабильность кубической фазы подтверждена исследованием теплоемкости в температурном интервале $T = 110$ – 293 К. Проанализированы ЭПР спектры исследуемого соединения в диапазоне температур $T = 77$ – 295 К. Установлено наличие дефектов в структуре. Проведено сравнение исследуемого соединения с родственными оксифторидами $\text{CsMnMoO}_3\text{F}_3$. Отмечено лишь небольшое изменение тепловых параметров и параметров ячеек.

Ключевые слова: оксифторид, рентгеноструктурный анализ, ЭПР спектры, теплоемкость.

SYNTHESIS, STRUCTURE, EPR SPECTRA AND HEAT CAPACITY OF CUBIC $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ OXYFLUORIDE

M. S. Molokeev, E. A. Petrakovskaya, V. S. Bondarev, E. M. Kolesnikova, N. A. Ivanov

Kirenskiy Institute of Physics of the SB RAS
50, bld.38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: msmolokeev@mail.ru

Oxyfluoride $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ has been prepared with the solid state synthesis. It was found that crystal is isostructural to pyrochlore and its crystal structure was defined with the Rietveld method more exactly. Despite the fact that the main structural element in this compound is distorted polyhedron, the cubic phase has been realized.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., № 8379.

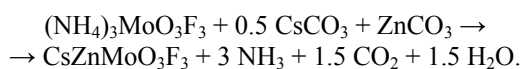
The stability of the cubic phase over the temperature range $T = 110\text{--}293\text{ K}$ was proved by the heat capacity measurement. The EPR spectra were analyzed over the range of $77\text{--}295\text{ K}$. The presence of defects was revealed. The comparison between compound under investigation and $\text{CsMnMoO}_3\text{F}_3$ was implemented. Just a tiny change of the thermal parameters and the cell parameters was registered.

Keywords: oxyfluoride; X-ray powder diffraction; EPR; heat capacity.

Исследуемое соединение принадлежит широкому классу оксифторидов с шестикординированным полиэдром $\text{MO}_x\text{F}_{6-x}$. Среди них можно выделить два семейства: 1) эльпасолиты-криолиты с общей формулой $\text{A}^+\text{B}^+\text{MO}_3\text{F}_3$ (Fm-3m , $Z = 4$) [1]; 2) пирокслоры $\text{A}^+\text{B}^{2+}\text{MO}_3\text{F}_3$, имеющие дефектную структуру типа RbNiCrF_6 (Fd-3m , $Z = 4$) [2; 3]. Несмотря на то, что основным структурным элементом в них является искаженный полиэдр $\text{MO}_x\text{F}_{6-x}$, в обоих этих семействах реализуются кубические фазы, благодаря разупорядочению фтор-кислородного полиэдра. Существует немало примеров, когда при определенных внешних условиях в эльпасолитах происходит упорядочение полиэдров, сопровождающееся понижением симметрии [4–7], и даже появлением полярной фазы [8–11]. Наличие у некоторых из них существенных барических коэффициентов dT/dp приводит к проявлению больших интенсивных и экстенсивных барокалорических эффектов, что в перспективе может быть использовано в твердотельных охладителях [12].

К сожалению, информация о пирокслорах со структурной единицей $\text{MO}_x\text{F}_{6-x}$, и особенно о фазовых переходах в них, практически отсутствует. Ранее нами проведен комплекс исследований по поиску фазовых переходов в соединении $\text{CsMnMoO}_3\text{F}_3$ [13], однако было установлено, что кубическая фаза остается стабильной в изученном интервале температур $110\text{--}293\text{ K}$. С другой стороны, недавно обнаружен ряд фазовых переходов во фтористом соединении CsFe_2F_6 со структурой пирокслора [14], что косвенно указывает на потенциальную возможность искажения кубической структуры в результате фазовых переходов и в оксифторидных пирокслорах. Именно это обстоятельство, а также вероятность обнаружения сегнетоэлектрических фаз, и привлекают к ним внимание. Особый интерес соединения этого структурного класса представляют в связи с возможностью варьирования химического давления в структуре за счет катионного замещения, в частности, магнитных ионов. Исследование $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ является логическим продолжением исследования фторкислородных пирокслоров с целью выявления влияния замещения магнитного катиона Mn^{2+} в $\text{CsMnMoO}_3\text{F}_3$ на немагнитный ион Zn^{2+} , имеющий существенно меньший ионный радиус.

Исследуемое соединение получено в виде мелкокристаллического порошка. В качестве исходных реагентов были выбраны $(\text{NH}_4)_3\text{MoO}_3\text{F}_3$, CsCO_3 и ZnCO_3 . Синтез проводился в соответствии с реакцией:



Структура соединения $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ уже исследовалась ранее в работе [2]. Однако структурные данные были не полными, так как отсутствовали коорди-

наты атомов кислорода и фтора. Перед нами стояла задача получить полную информацию о структуре и ее устойчивости к температуре.

Рентгенограмма поликристаллического образца $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ для последующего уточнения структуры методом Ритвельда получена на дифрактометре D8-ADVANCE (Cu-K α – излучение, θ -2 θ сканирование) с использованием линейного детектора VANTEC. Эксперимент проведен при комнатной температуре. Шаг сканирования по углу 2θ равен 0.016° , экспозиция составляла 1 секунду на шаг. Параметры ячеек взяты из работы [2] и уточнены в ходе подгонки профилей с использованием программы TOPAS 4.2 [15]. Основные параметры сбора данных и уточнения структуры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры сбора данных и уточнения структуры

Пространственная группа	$\text{Fd}\bar{3}m$
a , Å	10.43818(7)
V , Å ³	1137.30(2)
2θ -интервал углов, °	5 – 120
Число брэгговских рефлексов	58
Число уточняемых параметров	26
R_B , %	1.735
R_{wp} , %	8.228
R_p , %	6.324
R_{exp} , %	5.670
χ	1.451

Все расчеты и обработка массивов экспериментальных данных проводились по программе TOPAS 4.2. Для описания формы пиков была выбрана функция Пирсона VII.

Анализ погасаний отражений подтвердил, что пространственная группа соединения $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ действительно $\text{Fd}\bar{3}m$. Поиск и уточнение структуры проведены тем же путем, что и для $\text{CsMnMoO}_3\text{F}_3$ [13]. Координаты атомов, изотропные тепловые параметры и заселенности позиций приведены в табл. 2. Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные линии) рентгенограммы соединения представлены на рис. 1.

Структура является каркасной, в которой октаэдры $\text{Zn}(\text{Mo})\text{O}_3\text{F}_3$ связаны друг с другом вершинами, а ионы Cs находятся в межоктаэдрических полостях (рис. 2, а). Полиэдры $\text{Zn}(\text{Mo})\text{O}_3\text{F}_3$ представляют собой почти идеальные октаэдры, так как длины связей $\text{Zn}(\text{Mo})\text{--O}(\text{F})$ все одинаковые и равны $1.977(2)$ Å, а углы $\text{O}(\text{F})\text{--Zn}(\text{Mo})\text{--O}(\text{F})^*$ (* – операция симметрии $y-1/2$, z , $x+1/2$) находятся в пределах $87.8\text{--}92.2^\circ$. Ион Cs координирован 6 ионами O(F) с расстоянием $d(\text{Cs--O}(\text{F})) = 3.205\text{Å}$ и 12 ионами O(F) с расстоянием

$d(\text{Cs}-\text{O}(\text{F})) = 3.738\text{\AA}$, поэтому полная координация иона Cs ионами O(F) равна 18. Таким образом, оказалось, что ион Cs координирован 12 октаэдрами $\text{Zn}(\text{Mo})\text{O}_3\text{F}_3$ (рис. 2, б).

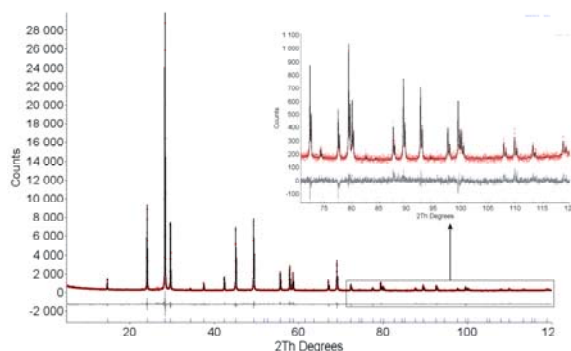


Рис. 1. Разностная рентгенограмма $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$

Сравнение структур $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ и $\text{CsMnMoO}_3\text{F}_3$ не выявило заметных отличий кроме закономерного изменения параметров ячеек: $a = 10.59151(4)\text{\AA}$ ($\text{CsMnMoO}_3\text{F}_3$) и $a = 10.43818(7)\text{\AA}$ ($\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$) и длин связей $d(\text{Zn}(\text{Mo})-\text{O}) = 1.977\text{\AA}$, $d(\text{Mn}(\text{Mo})-\text{O}) = 2.011(2)\text{\AA}$. Тепловые параметры тяжелых атомов в этих структурах также близки друг к другу. Лишь тепловой параметр атома F(O) в соединении

$\text{CsMnMoO}_3\text{F}_3$ $B = 4.6(1)\text{\AA}^2$ немного больше, чем в оксифториде $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ $B = 3.46(5)\text{\AA}^2$.

Стабильность кубической фазы к изменению температуры проверялась путем измерений теплоемкости порошкового образца $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ массой 0.1 г на дифференциальном сканирующем микрокалориметре ДСМ-10М. Термоциклирование в режимах нагрев-охлаждение со скоростью 8 К/мин в температурном интервале 110–293 К не привело к обнаружению аномалий, связанных фазовыми переходами.

Спектры ЭПР сняты на спектрометре Bruker Elexys E580(295K–85K) в X-диапазоне (рис. 3). Расшифровка спектра была выполнена моделированием с помощью производных линий формы Лоренца и Гаусса (табл. 3). Наиболее удачно спектр модулируется четырьмя линиями. В спектре наблюдается узкая ($\Delta H = 40\text{Э}$) достаточно интенсивная линия с $g = 1.99$ и сопровождается близлежащими слабыми линиями, которые можно отнести к сверхтонкой структуре (СТС), связанной с электронно-ядерным взаимодействием. По этим признакам линию можно отнести к Mo^{5+} [16]. Линии СТС – несколько «размазаны», что можно объяснить наличием двух различных констант для ядер Mo и малого (~ 20 %) содержания атомов Mo, имеющих ядерные магнитные моменты. Так как в кристалле присутствует Mo^{6+} , появление указанной линии говорит о наличии изолированных дефектов.

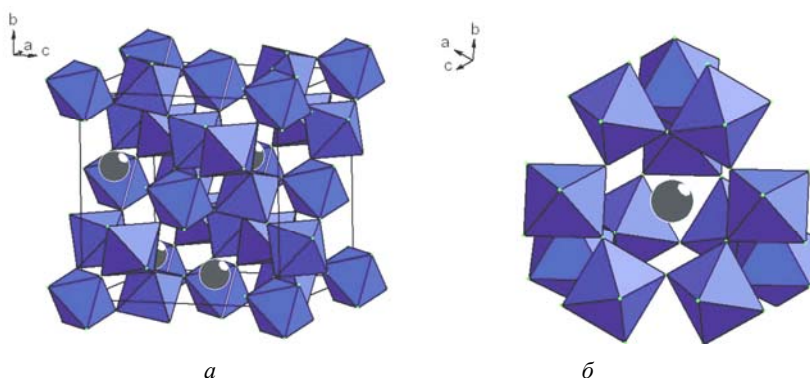


Рис. 2. Структура $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$: $\text{Zn}(\text{Mo})\text{O}_3\text{F}_3$ – октаэдры (а); координация иона Cs 12 октаэдрами $\text{Zn}(\text{Mo})\text{O}_3\text{F}_3$ (б)

Таблица 2

Координаты атомов, изотропные тепловые параметры (B_{iso}) и заселенности позиций(р) структуры $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$

Атом	р	X	Y	Z	$B_{\text{iso}}, \text{\AA}^2$
Cs	1.0	3/8	3/8	3/8	4.15(5)
Zn	0.5	0	0	0	3.46(5)
Mo	0.5	0	0	0	3.46(5)
F	0.5	1/8	5/8	0.4321(3)	3.2(1)
O	0.5	1/8	5/8	0.4321(3)	3.2(1)

Таблица 3

Параметры спектра ЭПР $\text{CsZnMoO}_3\text{F}_3$ для температуры 295K

Нрез., Ое	g-фактор	ΔH , Ое	M, произв. ед.	Форма линии
3248	1,99	40	3854	Лоренц
3192	2,032	410	185961	Гаусс
2831	2,26	69	2423	Гаусс
2810	2,299	255	49025,6	Гаусс

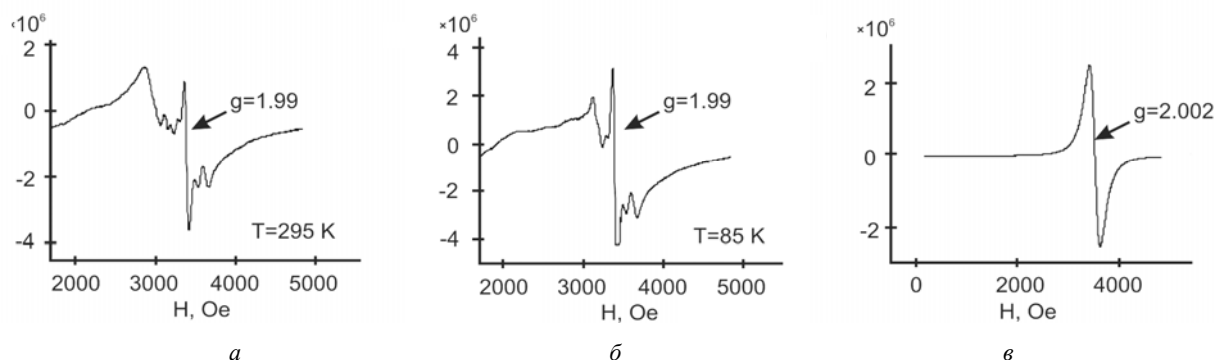


Рис. 3. Спектры ЭПР: CsZnMoO₃F₃ (а – 295 К; б – 85 К); CsMnMoO₃F₃ (в – 295 К)

Три другие линии можно приписать примесям случайно внесенных 3d-элементов. Линия $g = 2,26$ может принадлежать Cu^{2+} , так как при 85К на низкополевом крыле есть следы СТС, характерные для этого иона. Линия $g = 2,032$ возможно связана с Mn^{2+} или Fe^{3+} . А самая низкополевая линия может принадлежать Ni или Co. Ее магнитный момент сильно возрастает при 77К. Но количество этих примесей по величине сигнала ЭПР очень мало.

Снижение температуры несколько изменяет вид спектра (рис. 3, б). Происходит усиление линии 1, что соответствует парамагнитному поведению центра Mo. Для линий 2 и 3 магнитный момент тоже увеличивается. Наибольшее увеличение этого параметра наблюдается для 4-й компоненты. Возможно, она ответственна за рост намагниченности образца при близкой к 4К температуре.

Спектр ЭПР CsMnMoO₃F₃ (рис. 3, в) представлен одной интенсивной линией формы Лоренца. Это может свидетельствовать о наличии обменного взаимодействия между ионами Mn^{2+} , которым она принадлежит. Параметры спектра: $g = 2,002$; $\Delta H = 184\text{Э}$. Температурное поведение парамагнитное, магнитный порядок должен наступить при температуре ниже 85 К.

Определены и уточнены все координаты атомов CsZnMoO₃F₃. Сравнение двух структур CsZnMoO₃F₃ и CsMnMoO₃F₃ не выявило заметных отличий, кроме закономерного изменения параметров ячеек. Установлено существование кубической фазы в температурном интервале $T = 110\text{--}293\text{ К}$. Анализ спектров ЭПР показал изменение их вида при понижении температуры, что соответствует парамагнитному поведению центра Mo.

References

1. Pausewang G., Rüdorff W. Z. Über Alkali-oxofluorometallate der Übergangsmetalle $\text{A}_2\text{A}'\text{Mo}_x\text{F}_{6-x}$ -Verbindungen mit $x = 1, 2, 3$ (1969) *Z. Anorg. Allgem. Chem.*, 364, p. 69–87.
2. Babel D., Pausewang G., Viebahn W. Z. Die Struktur einiger Fluoride Oxide und Oxidfluoride AMe_2X_6 (1967) *Naturforsch.*, 22, p. 1219–1220.
3. Mattes R., Leimkühler V., Nagel A. Z. Ramanspektren anionen- und kationensubstituierter ternärer Oxide des Molybdäns und Wolframs mit

Pyrochlor- und hexagonaler Wolframbronzen-Struktur Einkristallstrukturuntersuchungen an CsZnMoO₃F₃, $\text{Rb}_{0,3}\text{Nb}_{0,3}\text{W}_{0,7}\text{O}_3$ und $\text{Rb}_{0,3}\text{Ga}_{0,1}\text{W}_{0,9}\text{O}_3$ (1990) *Z. Anorg. Allgem. Chem.*, 582, p. 131–142.

4. Fokina V. D., Flerov I. N., Gorev M. V., Molokeev M. S., Vasiliev A. D. and Laptash N. M. Effect of Cationic Substitution on Ferroelectric and Ferroelastic Phase Transitions in Oxyfluorides $\text{A}_2\text{A}'\text{WO}_3\text{F}_3$ (A, A': K, NH_4 , Cs) (2007) *Ferroelectrics*, 347 (1), pp. 60–64.

5. Pogorel'tsev E. I., Bogdanov E. V., Molokeev M. S., Voronov V. N., Isaenko L. I., Zhurkov S. A., Laptash N. M., Gorev M. V., Flerov I. N. Thermodynamic properties and structure of oxyfluorides $\text{Rb}_2\text{KMoO}_3\text{F}_3$ and $\text{K}_2\text{NaMoO}_3\text{F}_3$ (2011) *Physics of the Solid State*, 53, p. 1202–1211.

6. Molokeev M. S., Misyul' S. V. Structural transformations and the critical and noncritical parameters during the phase transition in the $(\text{NH}_4)_2\text{KWO}_3\text{F}_3$ oxyfluoride (2011) *Physics of the Solid State*, 53, p. 1672–1679.

7. Molokeev M. S., Misyul' S. V. Processes of ordering of structural elements, critical and noncritical parameters of phase transitions in the $(\text{NH}_4)_3\text{WO}_3\text{F}_3$ crystal (2012) *Physics of the Solid State*, 54, p. 155–165.

8. Flerov I. N., Fokina V. D., Bovina A. F., Bogdanov E. V., Molokeev M. S., Kocharova A. G., Pogorel'tsev, E. I., Laptash, N.M. Mechanism and nature of phase transitions in the $(\text{NH}_4)_3\text{MoO}_3\text{F}_3$ oxyfluoride (2008) *Physics of the Solid State*, 50, p. 515–524.

9. Atuchin V. V., Gavrilova T. A., Kesler V. G., Molokeev M. S., Aleksandrov K. S. Low-temperature synthesis and structural properties of ferroelectric $\text{K}_3\text{WO}_3\text{F}_3$ elpasolite (2010) *Chemical Physics Letters*, 493, p. 83–86.

10. Molokeev M. S., Misyul' S. V., Fokina V. D., Kocharova A. G., Aleksandrov K. S. Structure transformations during phase transitions in the $\text{K}_3\text{WO}_3\text{F}_3$ oxyfluoride (2011) *Physics of the Solid State*, 53, p. 834–839.

11. Atuchin V. V., Isaenko L. I., Kesler V. G., Lin Z. S., Molokeev M. S., Yelisseyev A. P., Zhurkov S. A. Exploration on anion ordering, optical properties and electronic structure in $\text{K}_3\text{WO}_3\text{F}_3$ elpasolite (2012) *J. of Solid State Chemistry*, 187, p. 159–164.

12. Flerov I. N., Gorev M. V., Tressaud A., Laptash N. M. Perovskite-Like Fluorides and Oxyfluorides: Phase

Transitions and Caloric Effects (2011) *Crystallography Reports*, 56 (1), p. 9–17.

13. Atuchin V. V., Molokeev M. S., Yurkin G. Yu., Gavrilova T. A., Kesler V. G., Laptash N. M., Flerov I. N., and Patrino G. S. Synthesis, Structural, Magnetic, and Electronic Properties of Cubic $\text{CsMnMoO}_3\text{F}_3$ (2012) *J. Phys. Chem. C*, 116, p. 10162–10170.

14. Molokeev M. S., Bogdanov E. V., Misyul S. V., Tressaud A., Flerov I. N. Crystal structure and phase

transition mechanisms in CsFe_2F_6 (2013) *J. of Solid State Chemistry*, 200, p. 157–164.

15. Bruker AXS TOPAS V4: General profile and structure analysis software for powder diffraction data. – User's Manual, Bruker AXS, Karlsruhe, Germany 2008.

16. Altshuller S. A., Kozyrev B. M. EPR soedinenii elementov promezhutochnykh grupp (Electron Paramagnetic Resonance of compounds of elements of intermediate groups). Moscow, Nauka Publ., 1972, 672 p.

© Молокеев М. С., Петраковская Э. А., Бондарев В. С., Колесникова Е. М., Иванов Н. А., 2013

УДК 66.081; 66.088; 538.975

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ НАНОТУБУЛЕНОВ В СЛОЕ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ*

С. В. Хартов¹, М. М. Симунин¹, Ю. В. Фадеев², И. В. Немцев^{1,3}, В. Я. Зырянов^{1,3}

¹Красноярский научный центр СО РАН

Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50. E-mail: ivan_nemtsev@mail.ru

²Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: info@sfu-kras.ru

³Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН

Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50, стр. 38. E-mail: zyr@iph.krasn.ru

Описывается оригинальная технология покрытия графитовыми слоями внутренних стенок пор в пластине анодного оксида алюминия. Для синтеза графитизированного углерода при низких температурах (от 500 °C) использован процесс осаждения из газовой фазы с применением оригинального катализатора, предварительно внедренного в поры. Исследована морфология полученных структур, а также показано, что графит, осажденный на стенки пор оксида алюминия, формирует цилиндрическую трубку – нанотубулен. Обсуждаются возможности использования полученных структур в качестве функционально активных элементов различного назначения, например, наномембран с управляемыми транспортными свойствами, элементов наноэлектроники и др.

Ключевые слова: углеродная нанотрубка, пористый анодный оксид алюминия, функционально активный материал, активная наномембрана, активное молекулярное сито.

TECHNOLOGY OF GRAPHITIC NANOTUBULES FORMATION IN THE POROUS ANODIC ALUMINA

S. V. Khartov¹, M. M. Simunin¹, Yu. V. Fadeev², I. V. Nemtsev^{1,3}, V. Ya. Zyryanov^{1,3}

¹Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS

50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: ivan_nemtsev@mail.ru

²Siberian Federal University

79 Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia E-mail: info@sfu-kras.ru

³Kirenskiy Institute of Physics of the SB RAS

50, bld.38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: zyr@iph.krasn.ru

The paper describes the original coating technology of covering the inner walls of the pores with the graphite layers in the anodic aluminum oxide plate. For the synthesis of graphitizing carbon at low temperatures (500 °C) the deposition process from the gas phase was used, with the use of the original catalyst pre-embedded in the pores.

*Работа выполнена частично при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (госконтракт № 14.513.11.0023), а также Министерства образования и науки Российской Федерации (договор № 02.G25.31.0043).

The morphology of the resulting structures is investigated and it is shown that the carbon deposited on the pore walls of the alumina forms the cylindrical tube – nanotubulene. The possibility of use of the resulting structures as functionally active elements for various purposes, such as nanomembranes with controlled transport properties, and other elements of nanoelectronics, is discussed.

Keywords: carbon nanotube, porous anodic alumina, functionally active material, active nanomembrane, active molecular sieve.

В настоящее время множество различных научных работ посвящено пористому анодному оксиду алюминия и его свойствам. ПАОА обещает ряд перспектив для использования в темплатных методах в качестве носителей для катализаторов и мембран [1–8]. К примеру, в работе [9] Masuda et al. синтезировали сквозную ПАОА мембрану с массивом наноразмерных пор, покрытых слоем сильно легированного бором алмаза. Однако в силу способа изготовления, предполагающего операцию сухого травления кислородной плазмой, толщина таких мембран не могла превышать 2 мкм. Механическая хрупкость мембран ограничивала возможность исследования транспорта через них.

В работе [10] был продемонстрирован синтез пленки гидрогенизированного аморфного углерода (алмазоподобная пленка – АПП) с использованием плазмоиндуцированного осаждения из газовой фазы в присутствии азота. Указанным образом был достигнут эффект легирования азотом АПП пленки, с приданием ей полупроводниковой проводимости n-типа. Данное покрытие отличалось от легированного бором алмаза на 3 порядка большим удельным объемным сопротивлением, однако аналогичным образом обеспечивало низкую сорбцию анионов, а также рекордно высокие потенциалы восстановления кислорода и водорода и, соответственно, широкое окно рабочих потенциалов. Мембраны данного типа имели достаточную толщину (10 мкм) и продемонстрировали возможность электрического переключения транспортных свойств как для анионов, так и для катионов, а также возможность функционирования при высоких потенциалах (от $-1,5$ до $+2,0$ В), без влияния фактора восстановления водорода и кислорода.

В целом, использование ПАОА как в чистом, так и в модифицированном виде в качестве мембран представляется перспективным. Таким образом, целью настоящей работы является создание технологии для синтеза мембран на основе пористого оксида алюминия покрытого графитовыми слоями. Эффективность технологии оценивалась по морфологии полученной мембраны, которая исследовалась методами растровой электронной микроскопии (РЭМ)

Условия эксперимента. В качестве несущего слоя мембраны и одновременно темплата для синтеза проводящего слоя, как и в случае описанных выше работ, использовался слой пористого анодного оксида алюминия (ПАОА) с диаметром пор 50 нм и толщиной слоя 15 мкм. ПАОА синтезировали на алюминиевой фольге марки А99 в оксолатном электролите в течение часа при плотности тока 10 мА/см^2 . Для увеличения упорядоченности электролита анодирование проводилось дважды, при этом после первого анодирования анодный оксид растворяли в хромовом травителе с ортофосфорной кислотой.

С целью создания на внутренней поверхности пор ПАОА проводящего слоя использовался процесс осаждения углерода из газовой фазы. В рамках данной операции в поры вводился никелевый катализатор, после чего осуществлялся синтез углеродных нанотрубок в порах ПАОА при 600°C на установке CVDomna [11].

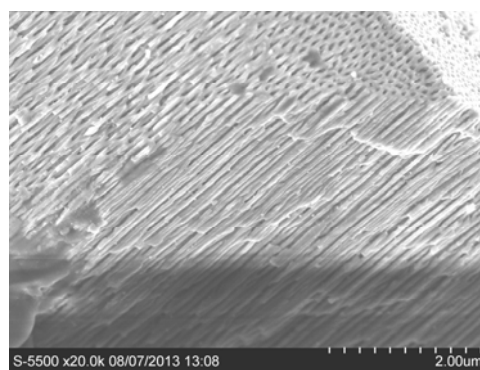


Рис. 1. Картина РЭМ ПАОА используемого в качестве темплата

Для получения сквозной мембраны были последовательно удалены алюминиевый и барьерный слои. Удаление алюминиевого слоя производилось медным буфером соляной кислоты. Травление продолжалось до полного удаления алюминия. Удаление барьерного оксида осуществлялось травителем на основе хромового ангидрида и ортофосфорной кислоты.

Для проведения заключительного этапа синтеза сквозной мембраны – удаления сферообразных концов углеродных трубок, была использована технология ионного травления. Поверхность мембраны подвергалась бомбардировке ионами кислорода ($P = 10^2 \text{ Па}$, $U = 2 \text{ кВ}$, $t = 30 \text{ мин}$). Материал трубок, в силу образования соединений CO и CO_2 , менее устойчив к ионному травлению, чем ПАОА, поэтому углеродные концы растравливались быстрее, чем разрушалась структура ПАОА. В результате была получена сквозная мембрана из ПАОА, поры которой содержат открытые с двух сторон проводящие трубки.

Результаты. По результатам описанной выше совокупности операций были сформированы структуры, обладающие следующей морфологией.

На прямой стороне ПАОА, где под прямой стороной понимается сторона с открытым входом в поры (в отличие от «тыльной» стороны ПАОА, под которой понимается сторона, обращенная к барьерному оксиду), сформировался слой из графитизированного углерода и углеродных нанотрубок, который механически и электрически соединяет все углеродные трубки, расположенные в порах (рис. 2).

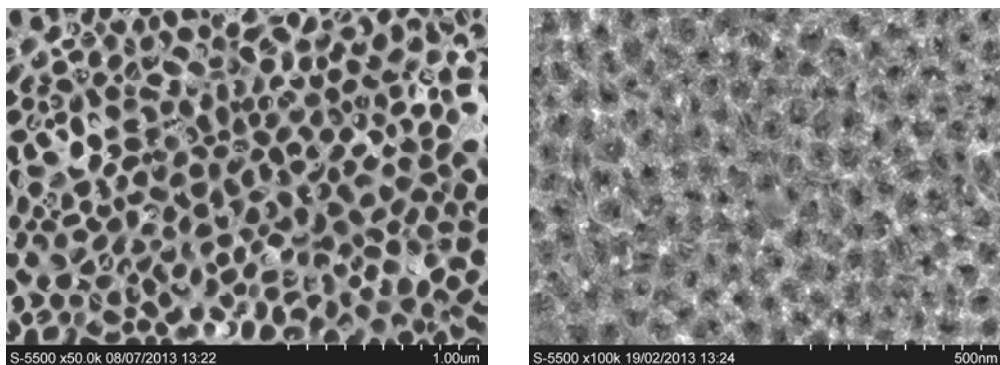


Рис. 2. Вход в поры после операции синтеза углеродных нанотрубок. РЭМ изображения

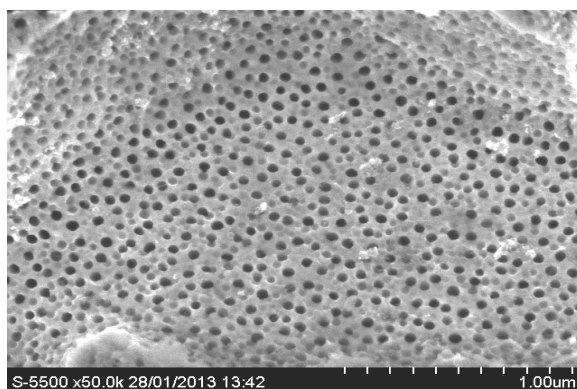


Рис. 3. РЭМ изображение планарного скола мембраны

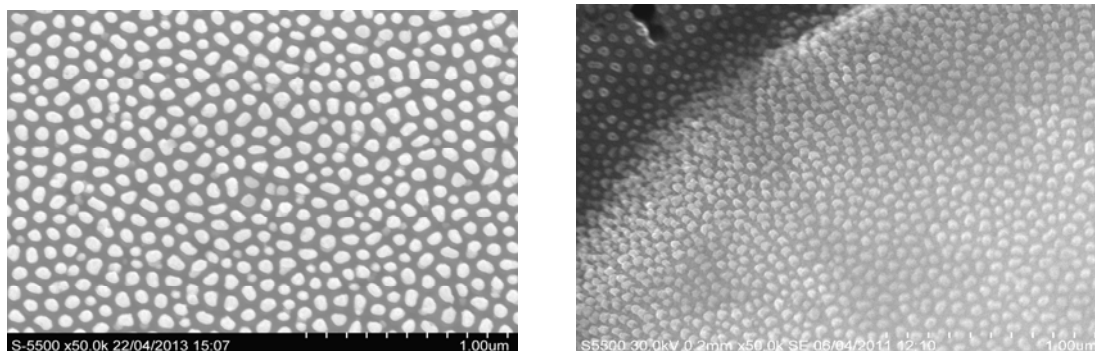


Рис. 4. РЭМ изображение пенок

Данный слой, таким образом, может выполнять функцию общего электрода. Переход расположенного по нормали к мембране тубулена в планарный графитизированный слой приводит к некоторому заужению входа в пору, который, тем не менее, остается открытым, и характеризуется величиной входного отверстия около 10–20 нм.

Исследование планарного скола мембраны показывает, что на остальной длине поры имеют поперечный размер около 40 нм (рис. 3), что примерно соответствует поперечному размеру пор исходного ПАОА.

С тыльной стороны ПАОА, которая освобождается после операций удаления алюминиевого слоя и барьерного оксида, оголяются кончики тубуленов. Данные кончики закрыты шапочками, темплатно сформиро-

ванными обращенной к порам поверхностью барьерного оксида (рис. 4).

Таким образом, можно видеть, что тубулены пронизывают ПАОА мембрану насквозь, доходя до тыльной стороны, где формируют закрытые шапочки. Это справедливо, как минимум, для ПАОА толщиной до 130 мкм. Выше указанной толщины ПАОА синтез структур не производился.

Аналогичный вывод о целостности тубуленов вдоль всей длины пор ПАОА подтверждают эксперименты по селективному удалению матрицы ПАОА. По результатам данной операции можно видеть внешнюю поверхность углеродных тубуленов (рис. 5) в то время как на изображениях скола мембраны зафиксировать наличие углеродного слоя не удается (рис. 3).

С целью получения сквозной мембраны, шапочки углеродных тубуленов должны быть вскрыты. Экспериментально авторами был опробован один из вариантов вскрытия шапочек, основанный на воздействии на структуры пучка ионов кислорода, которое приводит к переходу части углерода в газообразную фазу (CO или CO_2). На рис. 6 можно видеть результат операции вскрытия углеродных шапочек для различных величин времени воздействия.

Синтезирована структура на основе ПАОА со сквозными порами, которая может представлять интерес для реализации переключаемых электрическим полем мембран. В порах структуры расположены проводящие тубулены, подключенные к общему входному электроду. Для синтеза графитизированного углерода при низких температурах (от 500°C) использован процесс осаждения из газовой фазы с применением оригинального катализатора, предварительно внедренного в поры. С одной стороны мембраны проводящие тубулены терминированы закрытыми шапочками, которые вскрывались посредством обработки в ионном пучке. Тем самым формировалась структура с системой отдельных наноэлектродов, разделенных диэлектрическими зазорами.

References

1. Liu Y., Zhao M., Bergbreiter D. E., Crooks R. M., J. Am. Chem. Soc. 119 (1997) 8720–8721.
2. Zhang H., Ito Y., Langmuir 17 (2001) 8336–8340.
3. Lee D., Nolte A. J., Kunz A. L., Rubner M. F., Cohen R. E., J. Am. Chem. Soc. 128 (2006). 8521–8529.
4. Ito Y., Ochiai Y., Park Y. S., Imanishi Y., J. Am. Chem. Soc. 119 (1997) 1619–1623.
5. Ito Y., Park Y. S., Imanishi Y., Langmuir 16 (2000) 5376–5381.
6. Hollman A. M., Bhattacharyya D., Langmuir 18 (2002) 5946–5952.
7. Chun K. Y., Stroeve P., Langmuir 17 (2001) 5271–5275.
8. Lee S. B., Martin C. R., Chem. Mater. 13 (2001) 3236–3244.
9. Masuda H., Yasui K., Watanabe M., Nishio K., Nakao M., Tamamura T., Rao T. N., A. Fujishima, Electrochem. Solid-State Lett. 4 (2001) G101–G103.
10. Honda K., Yoshimatsu M., Kuriyama K. et al. Diamond & Related Materials 20 (2011) 1110–1120.
11. Bobrinetskiy I. I., Nevolin V. K., Simunin M. M. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2 (2007) 58–62.

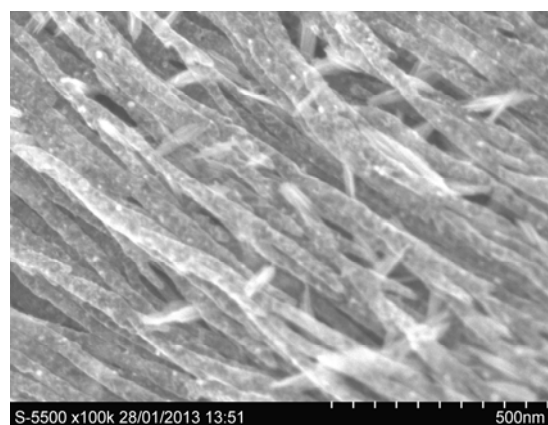


Рис. 5. РЭМ изображение тубуленов, освобожденных из матрицы

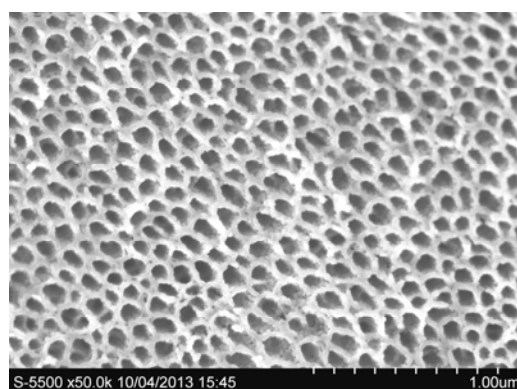
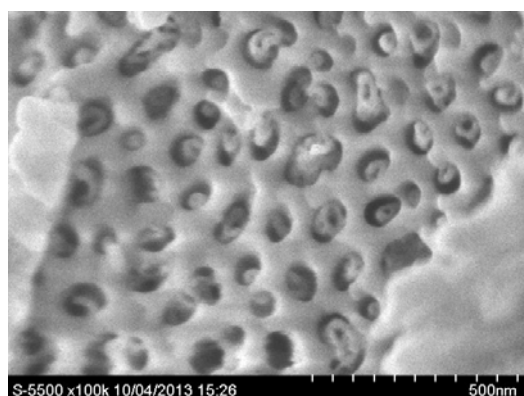


Рис. 6. Результат операции вскрытия шапочек углеродных тубуленов для различных величин времени воздействия пучком ионов. РЭМ изображения

РАЗДЕЛ
4



ЭКОНОМИКА



УДК 339.138

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РКП РОССИИ С ПОТРЕБИТЕЛЯМИ НА МЕЖДУНАРОДНОМ РЫНКЕ

В. А. Богомолов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: 2959735@gmail.com

Рассматриваются особенности взаимодействия предприятий ракетно-космической промышленности России с потребителями на международном рынке. Тема работы состоит в изучении специфики установления контактов и заключения контрактов на международном рынке космической техники. Цель работы – выявление особенностей установления контактов с зарубежными заказчиками продукции ракетно-космической промышленности России, изучение факторов, определяющих выбор компании-производителя космических аппаратов и изучение опыта успешной работы одного из ведущих предприятий ракетно-космической промышленности России с иностранными клиентами. В работе используются методы анализа экспертных мнений. Результатом работы является перечень факторов, определяющих особенности взаимодействия предприятий ракетно-космической промышленности России с потребителями на международном рынке, которые необходимо учитывать при организации взаимодействия с зарубежными заказчиками, что позволит повысить эффективность деятельности на международном рынке.

Ключевые слова: взаимодействие с потребителями, ракетно-космическая промышленность, международный рынок.

THE FEATURES OF INTERACTION OF RUSSIAN SPACE INDUSTRY COMPANIES WITH CONSUMERS AT INTERNATIONAL MARKET

V. A. Bogomolov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: 2959735@gmail.com

The features of interaction of Russian space industry companies with consumers at international market are considered. The article is aimed to research of the features of making contacts and signing contracts at international market of space products. The purpose of the article is to identify the features of making contacts with foreign consumers of Russian space industry products, to study factors defining the selection of space products manufacturer and to study experience of one of the most successful companies of Russian space industry in communication with foreign clients. Methods of analysis of expert opinions are used. The result of the work is the list of factors defining the features of interaction of Russian space industry companies with consumers at international market that should be considered during organizing interaction with foreign clients. The list helps to increase effectiveness of international market activity.

Keywords: interaction of customers, space industry, international market.

В последние годы все большее внимание уделяется необходимости увеличения объемов экспорта продукции с высокой добавленной стоимостью из России. Задача снижения зависимости бюджета страны от мировых цен на нефть и газ является стратегической. В связи с этим особую важность приобретает продвижение продукции предприятий ракетно-космической промышленности России за рубеж. В то же время, российские предприятия РКП до начала 90-х годов не осуществляли самостоятельно взаимодействие с потребителями, в связи с чем испытывают трудности с продвижением своей продукции на международном рынке. Целесообразным является рассмотреть успеш-

ный опыт предприятий РКП по организации взаимодействия с иностранными заказчиками.

В качестве объекта исследования рассматривается Открытое акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева», ведущее российское предприятие по производству космических аппаратов. Компания успешно работает с зарубежными заказчиками, причем не только в рамках межправительственных соглашений, но и в рамках коммерческих тендеров.

В связи активным продвижением на международный рынок продукции ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетне-

ва» и потребности в поиске заказчиков, установлении и поддержании контактов с ними, стало необходимым внести изменения в организационную структуру. Следовало создать структуру, которая была бы в состоянии гибко реагировать на изменения внешней среды и максимально соответствовать международным стандартам ведения бизнеса.

Такой структурой стало Управление стратегического развития (УСР), в ведении которого находится поиск зарубежных клиентов, и заключение и ведение международных контрактов. УСР решает следующие задачи:

- подготовка предложений и соответствующих материалов, необходимых для принятия участия в конкурсах на создание коммерческих спутниковых систем различного назначения;
- поиск потенциальных партнеров и субподрядчиков для наиболее эффективной реализации проектов;
- интерфейс и обеспечение взаимодействия различных подразделений ОАО «ИСС», компиляция наиболее эффективных решений и предложений;
- обеспечение взаимодействия сотрудников различных подразделений ОАО «ИСС» с представителями зарубежных компаний (заказчиков и партнеров);
- прием и размещение представителей отечественных и зарубежных компаний-заказчиков (субподрядчиков).

В состав Управления стратегического развития входят:

- Служба перспективных проектов – непосредственно поиск проектов, проведение переговоров, выезд за рубеж для участия в тендерах. География командировок, которые составляют значительное время в деятельности сотрудников отдела, обширна – Израиль, Индонезия, Колумбия, Франция, Перу, страны СНГ;
- Отдел протоколирования – обеспечение процесса заключения контракта, его ведения, организация и проведение встреч сотрудников ОАО «ИСС» и представителей заказчиков и зарубежных партнеров. Имеется представительский офис, отвечающий всем мировым стандартам ведения переговорного процесса;
- Отдел обеспечения переводов – перевод документации, контрактов, переводческое обеспечение переговорного процесса.

Схема непосредственного подчинения руководству и наделения соответствующими полномочиями позволяет более оперативно реагировать на поступающую информацию (как извне, так и от соответствующих подразделений ОАО «ИСС»), доводить до руководства и принимать максимально эффективные решения.

В настоящий момент ОАО «ИСС» на международном рынке предлагает услуги по разработке, изготовлению и поставке геостационарных коммуникационных спутниковых систем. Потребителями данных услуг являются международные операторы спутниковых телекоммуникаций. Общее число потенциальных потребителей превышает 160 компаний.

Несмотря на общее большое количество операторов, основными игроками мирового рынка являются 26 операторов.

ОАО «ИСС» активно участвует в международных конкурсах и тендерах, проводимыми зарубежными спутниковыми операторами. В 2008 г. ОАО «ИСС» выиграло тендер на разработку, изготовление и поставку геостационарной коммуникационной спутниковой системы «AMOS-5» для Израильского оператора Amos-Spacescom. В 2011 г. произведен успешный запуск спутника.

В 2009 г. ОАО «ИСС» выиграло тендер на разработку, изготовление и поставку геостационарной коммуникационной спутниковой системы «TELKOM-3» для Индонезийского оператора PT Telkom.

В 2010 г. был подписан контракт с канадской компанией MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd (MDA) на изготовление спутника Lybid, запуск которого назначен на 4 квартал 2013 г.

В 2011 г. был подписан контракт на изготовление телекоммуникационного спутника KazSat-3, заказчиком выступает АО «Республиканский центр космической связи» (Республика Казахстан). Предварительный срок запуска космического аппарата – начало 2014 г. [1]

Таким образом, можно сделать вывод, что основными регионами интересов ОАО «ИСС» являются Европа, Азия, Ближний Восток и Африка, Северная и Южная Америка.

Из 26 крупнейших мировых спутниковых операторов клиентами ОАО «ИСС» являются лишь 4 из них – ФГУП «Космическая связь», ООО «Газпром – космические системы», Amos-Spacescom (Израиль), PT Telkom (Индонезия). Поэтому имеются значительные перспективы роста. Малое количество международных контрактов связано с тем, что ОАО «ИСС» лишь сравнительно недавно вышел на данный рынок, поэтому потенциальные заказчики пока что относятся с осторожностью к продукции предприятия.

В связи со спецификой мирового рынка, заключающейся в том, что данные услуги включают в себя, в том числе, и услуги по выводу КА на орбиту, ряд конкурентов ОАО ИСС на внутреннем рынке при деятельности на зарубежных рынках переходят в разряд поставщиков, как, например, ГКНПЦ «им. Хруничева», поставляющие средства выведения на орбиту (ракеты-носители «Протон-М»).

Основными конкурентами ОАО «ИСС» на международной арене являются:

- NEC Toshiba;
- Thales Alenia Space;
- Orbital Sciences Corporation;
- Space Systems Loral;
- Lockheed Martin;
- EADS Astrium.

Для определения перечня факторов, оказывающих влияние на принятие заказчиком решения о выборе поставщика спутниковых систем, было проведено экспертное исследование.

Специфика рынка заключается в том, что круг конкурентов постоянен (что связано с большими барьерами входа на рынок), поэтому во всех международных тендерах постоянно участвуют одни и те же компании. Неценовая конкуренция на рынке сведена к минимуму, все игроки предлагают продукцию сходного качества, поэтому в большинстве случаев на первое место выходит ценовая конкуренция – компания, предложившая меньшую цену, выигрывает тендер.

На принятие решения о заключении или не заключении контракта на поставку спутниковой системы влияют следующие неценовые факторы (в порядке убывания важности):

1) условия контракта, в том числе сроки, график платежей. Обычно платежи осуществляются в течение 26–29, максимум – 30 месяцев;

2) содержание работ по контракту, в том числе в данном пункте учитывается, какие работы подрядчик выполняет сам, а какие отдаются субподрядчикам;

3) технические характеристики платформы, полезной нагрузки, наземного комплекса управления (НКУ), совместимости с существующими ракетами-носителями, характеристики предлагаемой ракеты-носителя. В частности, здесь учитываются требования к миссии, надежности систем, сроку службы и т. д. Необходимо отметить, что технические требования являются наиболее формализованными и изначально указываются в документе, называемом Request for Proposal (RFP, запрос на предложение). Затем с учетом заданных требований к КА формируются матрицы соответствия по каждому из разделов, после чего подается заявка на участие в конкурсе;

4) сопроводительная документация. В данном пункте учитывается объем и форма предоставления документации ко всем системам спутника и НКУ, а также дополнительная информация;

5) обучение персонала. Помимо стандартного обучения некоторые потребители запрашивают дополнительные услуги, например, обучение сотрудников компании-заказчика в форме интернатуры;

6) гарантии качества. Здесь учитывается соответствие предприятия международным стандартам качества, мероприятия по обеспечению и контролю качества.

В космической отрасли при продвижении продукции очень важна система корпоративных марок. При разработке взаимодействия корпоративной марки с марками товаров в большинстве случаев в космической отрасли используется стратегия Branded House (компания-бренд), т. е. компания своим брендом как бы ручается за качество продукции, которую ему придется произвести. И в этом случае корпоративный бренд часто выступает в качестве поручителя (стратегия «марка-поручительство»). Этот момент очень важен для потребителей, так как процесс закупок космической техники сопряжен с большими рисками, и чем больше гарантий имеет заказчик, тем больше вероятность заключения контракта.

Следует отметить, что для ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева» характерна ситуация, когда корпоративная торговая марка доминирует над торговой маркой товара и тем самым выполняет главенствующую роль [2].

Основная проблема ОАО «ИСС» при работе на международном рынке – отсутствие постоянного контакта с потребителями (спутниковыми операторами) и нехватка оперативной информации о спросе на рынке разработки КА, а также зачастую – о требованиях, предъявляемых к продукту.

С учетом существующих проблем особо важным становится участие предприятия в международных выставочно-ярмарочных мероприятиях, которые являются важными событиями в отрасли. Именно на выставках и конференциях спутниковые операторы объявляют о предстоящих тендерах, а так же о своих требованиях.

Следует отметить, что наладить контакт с некоторыми потенциальными потребителями возможно исключительно в ходе работы выставки, которые представляют собой «срез» отрасли. «Нет на выставке – нет на рынке» – данное высказывание полностью отражает современные реалии мирового рынка спутниковых телекоммуникаций.

Еще одной отличительной особенностью потребительского поведения являются предпочтения при выборе выставочных мероприятий. В частности, представители спутниковых операторов редко принимают участие в крупных авиакосмических салонах, таких как Фарнборо и Ле-Бурже. Это вызвано тем, что на подобных мероприятиях гораздо больше внимания уделяется авиационной продукции, затем – оборонной промышленности, в то время как коммерческий сегмент космической отрасли остается без должного внимания. В то же время, отличительной чертой небольших узкоспециализированных выставок телекоммуникационной тематики является большая доля (более 90 % против 30–50 % на авиакосмических салонах) профессиональных посетителей, в результате чего есть больше возможностей найти потенциальных партнеров и заключить выгодные контракты. Именно подобные мероприятия предпочитает большинство потенциальных клиентов ОАО «ИСС» в коммерческом сегменте.

Следует также отметить, что у некоторых спутниковых операторов существуют также предпочтения по конкретным выставкам. В частности, индонезийский спутниковый оператор IndoSAT работает лишь с теми компаниями, которые принимают участие в выставке-конференции «Pacific Telecommunication Conference». Практически все ведущие спутниковые операторы мира принимают участие в выставке «Satellite», ежегодно проводимой в США. [2]

Таким образом, проанализировав особенности взаимодействия с потребителями на мировом рынке коммерческих телекоммуникационных спутников на примере ОАО «ИСС», можно сделать следующие выводы:

1. Основным фактором, влияющим на принятие решения о заключении контракта на поставку спутниковой системы, является цена и условия оплаты.

2. Неценовая конкуренция на рынке сведена к минимуму, так как технические требования потребителей к КА в высокой степени формализованы, а прочие условия не имеют большого веса.

3. На принятие решение о заключении контракта так же оказывает значительное влияние опыт, имидж и репутация компании на международном уровне.

4. Основная проблема компаний при работе на международном рынке – отсутствие постоянного контакта с потребителями (спутниковыми операторами).

5. Основной инструмент коммуникации заказчиков космических аппаратов с производителями – выставочные мероприятия.

6. Взаимодействие с потребителями на международном рынке должно осуществляться самостоятельной структурной единицей, которая должна подчиняться непосредственно высшему руководству предприятия с наделением соответствующими полномочиями.

Библиографические ссылки

1. Программы и проекты ОАО «ИСС» [Электронный ресурс]. URL: http://www.iss-reshetnev.ru/?cid=programs_and_projects (дата обращения: 12.06.2013).

2. Промышленный маркетинг : учеб. пособие / сост.: Ю. В. Данильченко, Н. В. Федорова, Н. В. Кузоро ; СибГАУ. Красноярск, 2007. 150 с.

3. Satellite 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.satellitetoday.com/> (дата обращения: 19.06.2013).

References

1. Programs and projects OJSC “ISS”. Available at: <http://www.iss-reshetnev.ru> (accessed 12 June 2013).

2. *Promyshlenniy marketing, uchebnoe posobie* (Industrial marketing, Coursebook). Yu. V. Danilchenko, N. V. Fedorova, N.V. Kuzoro; SibSAU. Krasnoyarsk, 2007. 150 p.

3. Satellite 2013. Available at. URL: <http://www.satellitetoday.com/> (accessed 19 June 2013).

© Богомолов В. А., 2013

УДК 658

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУР РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А. В. Рябченко

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

Цель работы – формирование организационно-экономического механизма функционирования интегрированных структур в современных условиях хозяйствования, направленного на повышение эффективности деятельности и обеспечение создания современной ракетно-космической техники. В работе используются методы: стратифицированного представления, анализа и синтеза сложных социально-экономических систем. Результатом работы является модель организационно-экономического механизма функционирования интегрированных структур, применение которой позволит повысить эффективность комплексной деятельности корпораций в современных условиях, обеспечивая достижение целей функционирования.

Ключевые слова: организационно-экономический механизм функционирования, интегрированная структура, ракетно-космическая промышленность.

ORGANIZATIONAL AND ECONOMIC MECHANISM OF FUNCTIONING OF THE INTEGRATED STRUCTURES OF THE SPACE-ROCKET INDUSTRY

A. V. Ryabchenko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sahs@inbox.ru

The organizational and economic mechanism of functioning of the integrated structures of the space-rocket industry, with the account of the features of corporations activities and modern conditions of management, is considered. The subject of the work is the study of the organizational and economic mechanism of the integrated structures functioning. The purpose of the work is the developmnt of the organizational and economic mechanism of the integrated structures functioning in the modern conditions of the managing directed on the increase of the activity

efficiency and ensuring the creation of the modern missile and space equipment. In the work the following methods are used: the stratified representation, the analysis and synthesis of complex social and economic systems. The result of the work is the created model of the organizational and economic mechanism of the integrated structures functioning, application of which will allow to increase the efficiency of complex activity of corporations in modern conditions, providing achievement of the objectives of functioning.

Keywords: organizational and economic mechanism of functioning, integrated structure, space-rocket industry.

Реализация Стратегии развития ракетно-космической промышленности (РКП) на период до 2015 г., осуществляется организационно-экономическим механизмом функционирования (ОЭМФ) отрасли. ОЭМФ РКП представляет собой «... совокупность организационно-экономических структур, формирующих отрасль и уровней управления, включающих законодательные, финансово-экономические и организационно-административные методы воздействия, обеспечивающие непрерывное развитие отрасли» [1].

Ключевые направления, реализуемые ОЭМФ РКП [2]:

- формирование интегрированных структур (ИС);
- разработка и внедрение инновационных технологий;
- обновление производственных фондов
- совершенствование управления ИС и т. д.

Основу ОЭМФ РКП составляет формирование ИС. ИС РКП представляют собой корпорации, в которых объединены предприятия, связанные отношениями собственности и единой направленностью деятельности, обеспечивающие создание ракетно-космической техники (РКТ) оборонного и гражданского назначения.

ИС РКП делятся на корпорации двух типов. Корпорации первого типа – это горизонтальные ИС, реализующие замкнутый жизненный цикл (ЖЦ), укрупнено состоящий из этапов разработки, производства, эксплуатации и утилизации изделий РКТ (ракетные двигатели, разгонные блоки, системы автоматики и управления, и др.).

Корпорациями второго типа, являются вертикальные ИС, обеспечивающие замкнутый ЖЦ финальной РКТ.

Проводимые структурно-организационные преобразования в отрасли не обеспечивают решения всех системных проблем, накопленных в отрасли за последние два десятилетия, что приводит к необходимости разложения ОЭМФ РКП на составляющие его ОЭМФ ИС и их адаптации к современным условиям хозяйствования (рис. 1).

Под ОЭМФ ИС предлагается понимать совокупность организационно-экономических структур, формирующих корпорации РКП и уровней управления, обеспечивающие интеграционное взаимодействие объединенных предприятий для достижения целей функционирования.

Систему управления ОЭМФ РКП составляют, уровень национальной экономики и уровень отрасли. Верхний уровень управления по отношению к РКП будет являться внешним воздействием, отраслевой уровень управления реализуется отраслевыми организационно-экономическими структурами (рис. 1).

Уровни управления ОЭМФ ИС РКП составляют уровень отрасли и уровень корпорации. Отраслевой уровень управления ИС РКП выступает внешним воздействием, корпоративный уровень управления осуществляет внутреннее воздействие (рис. 1).

Сложность системы управления ИС обуславливает необходимость рассмотрения основных свойств ОЭМФ, к которым относятся: статичность, динамичность и результативность (эффективность). Статичность определяет состав и взаимосвязи между подсистемами ИС (структуру изучаемой системы), динамичность – процесс функционирования ИС (интеграционное взаимодействие подсистем между собой и внешней средой), результативность – решение задач и достижение целей (эффективность функционирования).

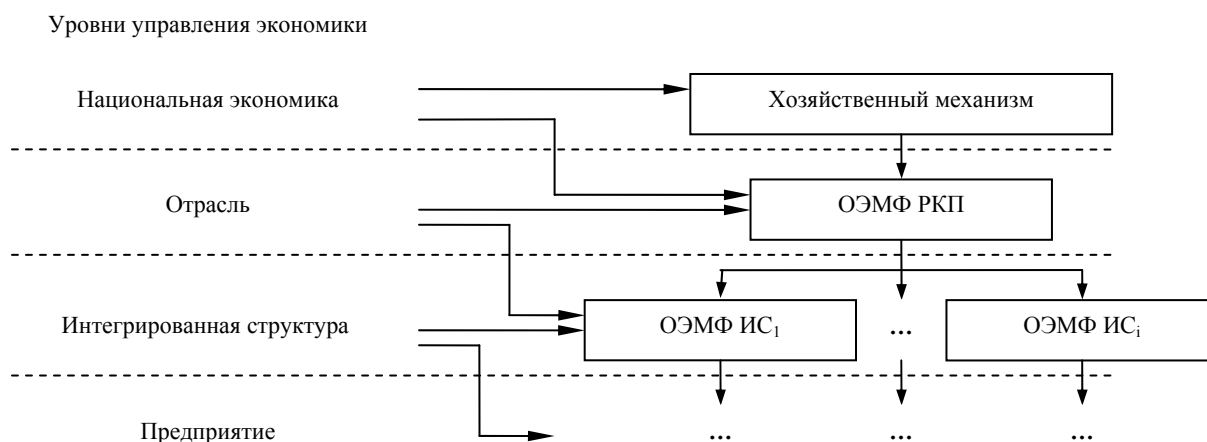


Рис. 1. Уровни управления в ОЭМФ РКП и ОЭМФ ИС РКП

Основу изучения структурной организации ИС составляет метод стратифицированного описания сложных систем или метод структурных уровней. Данные методы равнозначны при описании и моделировании сложных социально-экономических систем, позволяют сформировать набор моделей и описывать поведение системы с различных уровней.

Описание структуры системы строится на ряде переменных, законов и принципов, свойственных определенному уровню. Данное описание предполагает независимость моделей, описывающих различные уровни системы, представляя иерархическую упорядоченность подсистем. Синтез системы показывает, что все выделенные уровни находятся в тесной взаимосвязи и взаимообусловленности, что позволяет получить наиболее полное описание поведения всей системы в целом. Уровни структурной организации

корпораций РКП выделены на основе функциональных подсистем [3; 4]: НИОКР, технологической, производственной, экономической, социальной, организационной, управленческой, институциональной и маркетинговой.

Стратифицированное представление структурной организации ИС РКП, основанное на перечисленных выше функциональных подсистемах позволило выделить шесть страт (уровней), которые составляют совокупность организационно-экономических структур ОЭМФ ИС (рис. 2):

- научно-техническая структура;
- производственно-технологическая структура;
- социально-экономическая структура;
- организационно-хозяйственная структура;
- институциональная структура;
- маркетинговая структура.

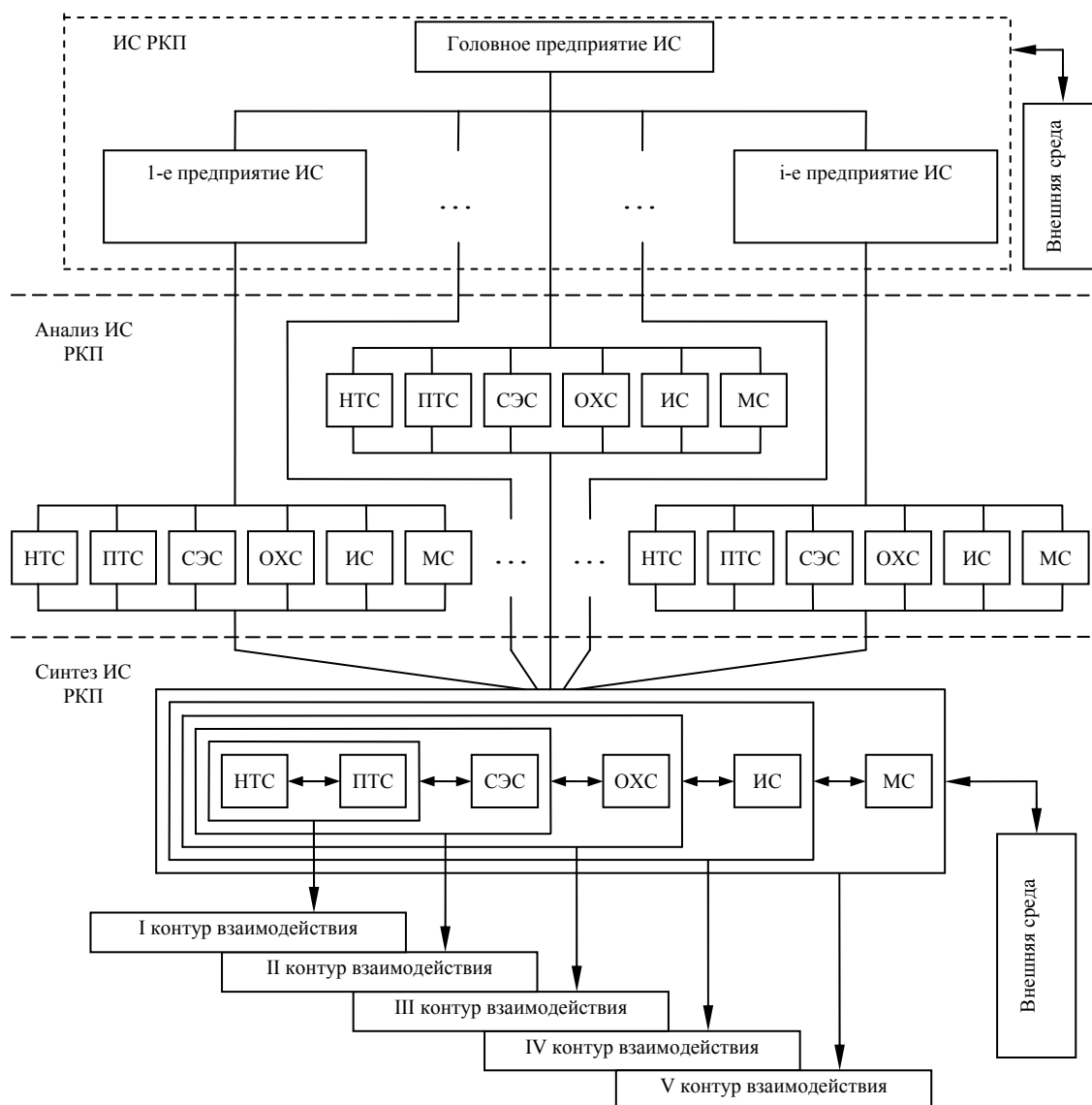


Рис. 2. Структурная организация корпорации РКП

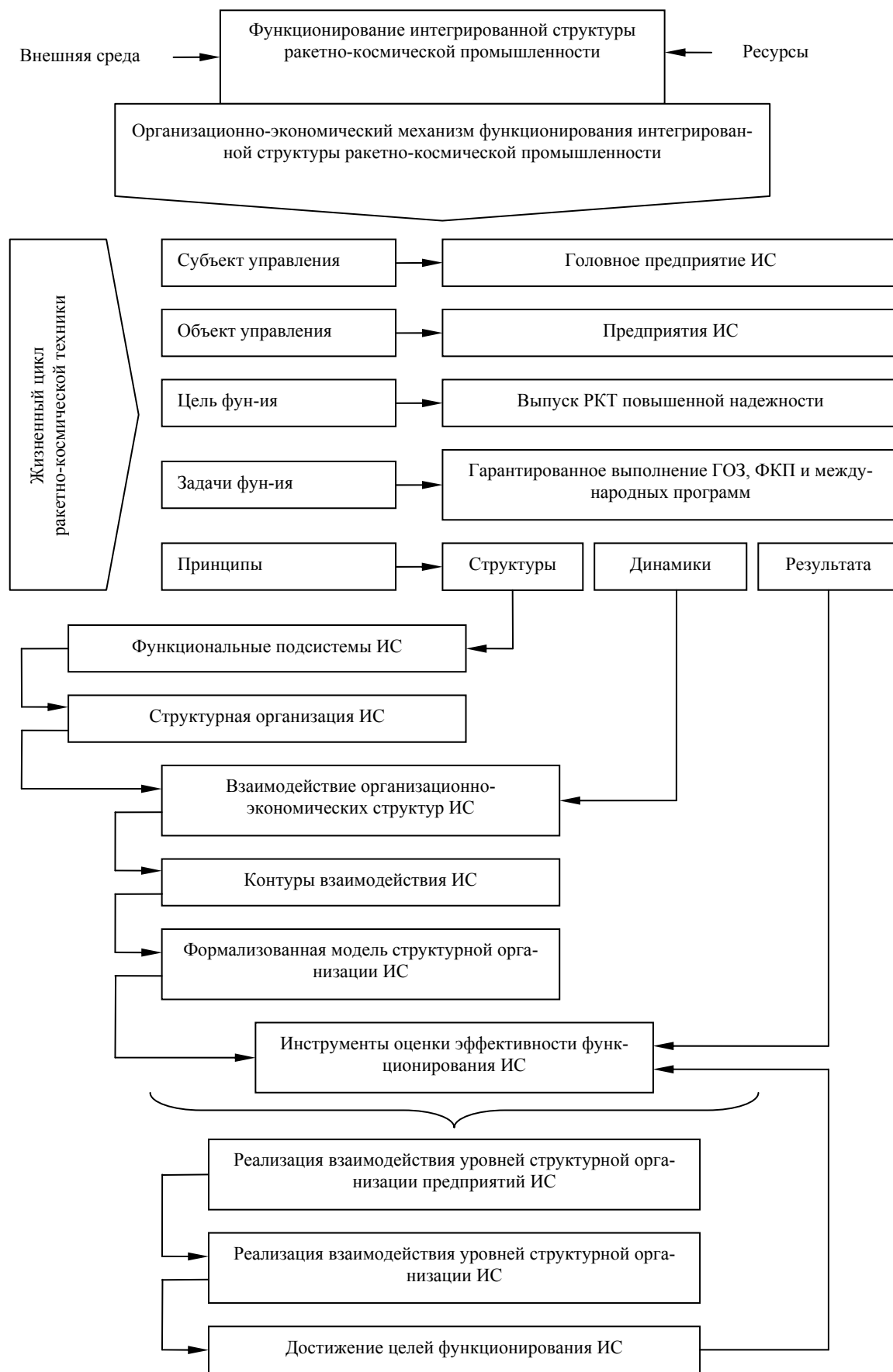


Рис. 3. Организационно-экономический механизм функционирования ИС РКП

		Организационно-экономические структуры ИС					
		НТС	ПТС	СЭС	ОХС	ИС	МС
Орг.-эк. структуры ИС	НТС	Инновации					
	ПТС		Производство				
	СЭС			Персонал, экономика			
	ОХС				Управление		
	ИС					Институты	
	МС						Маркетинг
		Система показателей					

Рис. 4. Система инструментов оценки эффективности ОЭМФ ИС РКП

Данная система инструментов оценки позволит осуществлять контроль за ходом выполнения договорных обязательств по Государственному оборонному заказу, Федеральной космической программе и программам международного сотрудничества.

Применение представленного ОЭМФ ИС РКП, позволит повысить эффективность управления комплексной деятельностью корпораций в современных условиях, обеспечивая достижение целей функционирования.

Библиографические ссылки

1. Удальцова Н. Л. Организационно-экономический механизм функционирования отрасли национальной экономики // Экономика и управление. 2012. № 6 (91). С. 94–98.
2. Лавров А. С. Ракетно-космическая отрасль России: реальность и перспективы устойчивого развития. М. : РАП, 2004. 260 с.
3. Ромашов А. В., Баранов В. В. Стратегии развития научно-производственных предприятий аэрокосмического комплекса: инновационный путь. М. : Альпина Паблишерз, 2009. 215 с.

4. Бендиков М. А. Стратегическое планирование развития наукоемких технологий и производств: на примере космического машиностроения. М. : Academia, 2000. 303 с.

References

1. Udaltsova N. L. *Ekonomika i upravlenie*. 2012, no. 6 (91), p. 94–98.
2. Lavrov A. S. *Raketno-kosmicheskaya otasl' Rassii: realnost i perspektivi ustoichivogo razvitiya* (Space-rocket branch of Russia: reality and prospects of a sustainable development). Moscow, RAP, 2004, 260 p.
3. Romashov A. V. *Strategii razvitiya nauchno-proizvodstvennih predpriyatiy aerokosmicheskogo kompleksa: innovatsionnyi put* (Strategy of development of the scientific and production enterprises of a space complex: innovative way). Moscow, Alpina Publisherz, 2009, 215 p.
4. Bendiktoy M. A. *Strategicheskoye planirovaniye razvitiya naukoemkih tehnologii i proizvodstv: na primere kosmicheskogo mashinostroeniya* (Strategic planning of development of high technologies and productions: on the example of space mechanical engineering). Moscow, Academia, 2000, 303 p.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Антамошкин О. А., Пузанова Г. А., Онтужев В. В. Особенности проектирования автоматизированной системы экспертной оценки информационной безопасности организаций.....	4
Богданов К. В., Ловчиков А. Н. Структура WEB-сервиса для моделирования электрических схем с существенными нелинейностями.....	9
Большаявичус А. В., Ковалев И. В., Лосев В. В. К вопросу функциональной аппроксимации нелинейных характеристик объектов систем автоматического регулирования непрерывных технологических процессов.....	12
Веселков С. А., Лапухин Е. Г. Новые светосильные объективы – апохроматы для астрономических исследований.....	17
Гончарук А. В., Лукьяненко М. В., Раевский В. А. Оценка возмущающего момента при моделировании движения системы наведения антенн.....	22
Горяшин Н. Н., Зорин А. Н., Лукьяненко М. В., Соломатова А. А. Анализ работы преобразователей напряжения повышающего типа с резонансным переключением при параллельном включении.....	27
Захаров Ю. В., Никулин А. К., Филенкова Н. В., Власов А. Ю. Устойчивость стержня под действием запаздывающей следящей нагрузки.....	32
Захаров Ю. В., Охоткин К. Г., Пашковский А. В., Скоробогатов А. Д., Уваев И. В. Тонкая круговая пластина под действием равномерно распределенной нагрузки гравитационного типа.....	37
Ивлева Н. В., Фибих Е. В. Использование новых информационно-коммуникационных технологий в обучении иностранным языкам студентов технических специальностей.....	40
Игнатъев М. Г., Копылов В. М., Кулаков А. Ю., Сотников М. В. Программный комплекс моделирования стабилизированного движения космического аппарата с трансформируемыми упругими элементами конструкции.....	45
Карцан И. Н., Охоткин К. Г., Карцан Р. В., Пахоруков Д. Н. Эффективность радионавигационных систем.....	48
Коробко А. В., Пенькова Т. Г. Представление и применение знаний о кубах-концептах для поддержки адаптивного манипулирования объектами анализа OLAP.....	51
Кузнецова А. С. Исследование функции роста в конечных двупорожденных группах периода 5.....	57
Личаргин Д. В., Сафонов К. В., Егорушкин О. И., Колбасина И. В., Старовойт Е. Д. Осуществление генерации синонимичных поисковых запросов на основе семантической классификации.....	62
Лопатин А. В., Деев П. О., Рутковская М. А. Устойчивость трехслойной панели со свободным краем в составе конструкции космического аппарата.....	68
Лопатин А. В., Пасечник К. А., Власов А. Ю., Шатов А. В. Разработка прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов: конечно-элементное моделирование конструкции.....	73
Лопатин А. В., Сенашов С. И. Исследования по механике деформируемого твердого тела в СибГАУ.....	79
Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Управление-II.....	85
Мизрах Е. А., Штабель Н. В. Исследование влияния вариаций параметров основных устройств и внешних возмущений на статическую точность имитаторов солнечных батарей.....	91
Рогозина М. С. Устойчивость многослойных линейных неоднородных разностных схем и амёбы алгебраических гиперповерхностей.....	95
Сенашов С. И., Черепанова О. Н., Кондрин А. В. Об упругопластическом кручении стержня.....	100
Тамбасов И. А., Немцев И. В., Савранский Д. С., Мацынин А. А., Ежикова Е. В. Влияние фотонной обработки и температуры на проводимость In_2O_3 пленок, полученных автоволновым окислением.....	103
Тарасов В. Г. Реализация локальной системы автоматизации процессов технического обслуживания и ремонта оборудования контроля и автоматики.....	107

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Алешечкин А. М., Дыдаева Н. Н., Кацура А. В., Мусонов В. М. Исследование методов определения относительных координат группы объектов.....	114
Бачурин А. С., Бобин К. Н., Матвеев К. А., Курлаев Н. В. Влияние закалки на остаточные деформации деталей летательных аппаратов из алюминиевых сплавов.....	119

Бачурин А. С., Бобин К. Н., Матвеев К. А., Курлаев Н. В. Численное моделирование влияния припуска на величину остаточных напряжений в деталях летательных аппаратов после закалки	123
Голубев Е. Н., Николаев А. О. Развитие и совершенствование методики стендовых испытаний бортового комплекса управления космического аппарата	128
Липатов А. Н., Ляш А. Н., Экономов А. П., Антоненко С. А., Захаркин Г. В. Звездный датчик для наноспутника	132
Непомнящий О. В., Охоткин К. Г., Хабаров В. А. Микроэлектронные системы управления исполнительной автоматикой перспективных космических аппаратов	137
Платов И. В. Эластичные вытеснительные устройства топливных баков	140
Тяпкин В. Н., Фатеев Ю. Л., Шарфунова Т. Г., Курносоев А. С., Штро П. В. Экспериментальные исследования погрешности измерения псевдодальностей в аппаратуре потребителей навигационной информации с фазированной антенной решеткой	143
Ханов В. Х., Шахматов А. В., Чекарчев С. А., Вергазов М. Ю., Лукин Ф. А. Разработка аппаратуры системы информационного обмена бортового комплекса управления малого космического аппарата	149
Якимов Е. Н., Раевский В. А., Лукьяненко М. В. Синтез системы управления ориентацией космического аппарата на высокоэллиптической орбите	153

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Бальва Я. Ф., Сержантов А. М., Ходенков С. А., Иванин В. В., Шокиров В. А. Полосно-пропускающий фильтр со сверхширокой полосой заграждения и уровнем подавления помех более 100 дБ	162
Власов А. Ю., Филенкова Н. В., Кравчук Д. Е. Разработка прецизионных антенных рефлекторов из полимерных композиционных материалов: система адаптивного управления технологическим процессом	166
Гайденок Н. Д., Серегин Н. Ю., Савенков Д. П., Майтакова А. В. К разработке концепции снижения остаточных напряжений в сварных соединениях при электронно-лучевой сварке, обусловленных термоупругими явлениями	169
Гордеев Ю. И., Абкарян А. К., Зеер Г. М., Лепешев А. А. Влияние добавок легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов	174
Демиденко Н. Д. Оптимальное управление режимами технологических печей	182
Демиденко Н. Д., Алясов М. И. Численное исследование стационарных режимов в технологических печах	187
Ильиных В. В., Ключников А. В., Лысых А. В., Михайлов Е. Ф., Тимошенко А. Г. Технология обеспечения качества при изготовлении высокоскоростных неуправляемых летающих моделей	191
Крушенко Г. Г. Влияние нагрева алюминиевой прутковой лигатуры на величину частиц алюминидов титана	197
Кузубов А. А., Елисеева Н. С., Краснов П. О., Куклин А. В., Сержантова М. В. Моделирование процесса диффузии водорода по вакансионному механизму в интерметаллическом гидриде Mg_2NiH_4	199
Куклин А. В., Елисеева Н. С., Кузубов А. А., Краснов П. О., Сержантова М. В. Теоретическое исследование сорбции водорода в интерметаллических соединениях Al_3Ti , Al_3Ni и Al_4Pd	204
Логинев Ю. Ю., Мозжерин А. В., Брильков А. В. Электронно-микроскопические исследования дефектообразования в легированных примесями монокристаллах $CdTe$, ZnS и $ZnSe$	209
Максимова О. А., Овчинников С. Г., Hartmann U., Косырев Н. Н., Варнаков С. Н. Анализ магнитного вклада в коэффициенты Френеля при магнитоэллипсометрических исследованиях	212
Михеев А. Е., Гирн А. В., Ивасев С. С., Евкин И. В. Исследование свойств защитных покрытий для космических аппаратов	217
Молокеев М. С., Петраковская Э. А., Бондарев В. С., Колесникова Е. М., Иванов Н. А. Синтез, структура, ЭПР спектры и теплоемкость кубического оксифторида $CsZnMoO_3F_3$	224
Хартов С. В., Симунин М. М., Фадеев Ю. В., Немцев И. В., Зырянов В. Я. Технология формирования графитизированных нанотрубуленов в слое пористого анодного оксида алюминия	228

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Богомолов В. А. Особенности взаимодействия предприятий РКП России с потребителями на международном рынке	234
Рябенко А. В. Организационно-экономический механизм функционирования интегрированных структур ракетно-космической промышленности	237

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Antamoshkin O. A., Puzanova G. A., Ontuzhev V. V. Design features of the computer-aided system of enterprise information security expert assessment	4
Bogdanov K. V., Lovchikov A. N. Structure of significant nonlinearity electric circuits of the WEB-service modeling.....	9
Bolsavichus A. V., Kovalev I. V., Losev V. V. To the question of the functional approximation of nonlinear characteristics of the objects of automatic control systems of the continuous technological processes	12
Veselkov S. A., Lapukhin E. G. New aperture lens as apochromats for astronomical research	17
Goncharuk A. V., Lukyanenko M. V., Raevskiy V. A. Evaluation of the disturbing moment in the antenna pointing system movement simulation	22
Goryashin N. N., Zorin A. N., Lukyanenko M. V., Solomatova A. A. Parallel operating of ZCT step-up boost converters	27
Zakharov Yu. V., Nikulin A. K., Filenkova N. V., Vlasov A. Yu. Stability of a column under the retarding follower load.....	32
Zakharov Yu. V., Okhotkin K. G., Pashkovsky A. V., Skorobogatov A. D., Uvaev I. V. Thin circular plate under a uniformly distributed load of the gravitational type	37
Ivleva N. V., Fibikh E. V. Use of new information and communication technologies in teaching foreign languages to technical students.....	40
Ignatyev M. G., Kopylov V. M., Kulakov A. J., Sotnikov M. V. Program complex for modeling of stabilized motion of spacecraft with transformable flexible parts	45
Kartsan I. N., Okhotkin K. G., Kartsan R. V., Pakhorukov D. N. Effectiveness of radio-navigation systems	48
Korobko A. V., Penkova T. G. Representation and implementation of knowledge about cube-concepts for analytical manipulation support	51
Kuznetsova A. S. Study of the growth functions in two-generator groups of the exponent 5	57
Lichargin D. V., Safonov K. V., Egorushkin O. I., Kolbasina I. V., Starovoyt E. D. Implementation of the generation of synonymic search queries based on semantic classification	62
Lopatin A. V., Deev P. O., Rutkovskaya M. A. Stiffness of the sandwich panel with free edge as a constructional part of a spacecraft	68
Lopatin A. V., Pasechnik K. A., Vlasov A. Yu., Shatov A. V. Development of composite precision satellite reflector: finite element construction modeling	73
Lopatin A. V., Senashov S. I. Investigations on the deformable solid body mechanics in SibSAU	79
Medvedev A. V. Theory of nonparametric systems. Control-II	85
Mizrah E. A., Shtabel N. V. Research of parameters variations impact on the static accuracy of solar array simulator	91
Rogozina M. S. Stability of multilayer inhomogeneous difference schemes and amoebas of algebraic hypersurfaces	95
Senashov S. I., Cherepanova O. N., Kondrin A. V. About elastoplastic torsion of rod	100
Tambasov I. A., Nemtsev I. V., Savranskiy D. S., Matsynin A. A., Ezhikova E. V. The impact of the photon processing and temperature on the conductivity of In ₂ O ₃ films produced with autowave oxidation	103
Tarasov V. G. Realization of the local system of automation of maintenance processes and repair of control and automation equipment	107

PART 2. AVIATION AND SPACE-ROCKET ENGINEERING

Aleshechkin A. M., Dydaeva N. N., Katsura A. V., Musonov V. M. Study of the methods for the objects group relative coordinates determination	114
Bachurin A. S., Bobin K. N., Matveev K. A., Kurlaev N. V. Residual deformation of aircrafts aluminum parts at hardening	119
Bachurin A. S., Bobin K. N., Matveev K. A., Kurlaev N. V. Numerical simulation of influence of the stock allowance on the residual stresses in aircraft parts after hardening.....	123
Golubev E. N., Nikolaev A. O. Development and improvement of the on-board control system test methods at test bench facility	128
Lipatov A. N., Lyash A. N., Ekonomov A. P., Antonenko S. A., Zakharkin G. V. The star sensor for the nanosatellite.....	132

Nepomnuashy O. V., Ohotkin K. G., Habarov V. A. Microelectronic systems for automation of perspective space vehicles	137
Platov I. V. Elastic feed systems of fuel tanks	140
Tyapkin V. N., Fateev Yu. L., Sharfunova T. G., Kurnosov A. S., Shtro P. V. Experimental investigations of pseudoranges measurement errors in navigation receiver with phased array	143
Khanov V. Kh., Shahmatov A. V., Chekmaryov S. A., Vergazov M. Yu., Lukin F. A. Development of the information exchange system equipment for the small spacecraft onboard control unit	149
Yakimov E. N., Raevskiy V. A., Lukyanenko M. V. Synthesis of the vehicle orientation control subsystem at the high elliptic orbit	153

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Balva Ya. F., Serzhantov A. M., Khodenkov S. A., Ivanin V. V., Shokirov V. A. The band-pass filter with the ultrawide stopband and interference rejection level more than 100 dB	162
Vlasov A. Yu., Filenkova N. V., Kravchuk D. E. Development of the precision satellite reflectors of polymeric composite materials: adaptive control system of manufacturing process	166
Gaidenok N. D., Seregin N. Yu., Savenkov D. P., Maytakova A. V. To the conception of reducing the residual stresses at the electron beam welding in welded joints caused by thermoelastic phenomena	169
Gordeev Yu. I., Abkaryan A. K., Zeer G. M., Lepeshev A. A. Effect of alloying additives of the ceramic nanoparticles on the structural parameters and properties of hard alloys	174
Demidenko N. D. Optimal control of technological furnaces regimes	182
Demidenko N. D., Alsov M. I. Numerical research of stationary modes in technological furnaces	187
Ilinykh V. V., Klyuchnikov A. V., Lysykh A. V., Mihailov E. F., Timoshchenko A. G. Technological support of quality during the manufacture of hypersonic uncontrollable flying models	191
Krushenko G. G. The effect of the aluminum master alloy heating on the size of titanium aluminide particles	197
Kuzubov A. A., Eliseeva N. S., Krasnov P. O., Kuklin A. V., Serzhantova M. V. Simulation of the of hydrogen diffusion by the vacancy mechanism in the intermetallic hydride Mg_2NiH_4	199
Kuklin A. V., Eliseeva N. S., Kuzubov A. A., Krasnov P. O., Serzhantova M. V. Theoretical study of hydrogen sorption in intermetallic compounds Al_3Ti , Al_3Ni and Al_4Pd	204
Loginov Yu. Yu., Mozherin A. V., Brilikov A. V. The electron microscopic study of the defect formation in the doped single crystals CdTe, ZnS and ZnSe	209
Maximova O. A., Ovchinnikov S. G., Hartmann U., Kosyrev N. N., Varnakov S. N. Magnetic contribution to fresnel coefficients at magnetoellipsometric investigation	212
Miheev A. E., Girn A. V., Ivasev S. S., Evkin I. V. Investigation of the space vehicles coatings features	217
Molokeev M. S., Petrakovskaya E. A., Bondarev V. S., Kolesnikova E. M., Ivanov N. A. Synthesis, structure, EPR spectra and heat capacity of cubic $CsZnMoO_3F_3$ oxyfluoride	224
Khartov S. V., Simunin M. M., Fadeev Yu. V., Nemtsev I. V., Zyryanov V. Ya. Technology of graphitic nanotubulenes formation in the porous anodic alumina	228

PART 4. ECONOMICS

Bogomolov V. A. The features of interaction of Russian space industry companies with consumers at international market	234
Ryabchenko A. V. Organizational and economic mechanism of functioning of the integrated structures of the space-rocket industry	237

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 статьей принимаются на CD-диске, флэш-диске (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 (слово «Вывод» в статье не пишется!). 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 (если авторы из разных организаций, их принадлежность к организации помечается цифрой (верхний индекс) после фамилии автора и перед названием организации);
- аннотация (авторское резюме);
- ключевые слова.

Блок 2 – информация Блока 1 в той же последовательности на английском языке.

Блок 3 – полный текст статьи на русском или другом языке (язык оригинала).

Блок 4 – Список литературы (Библиографические ссылки) с русскоязычными ссылками на русском языке по ГОСТ Р 7.0.5-2008 (для статей на русском языке).

Блок 5 – Список литературы (References) с русскоязычными и другими ссылками в романском алфавите (правила оформления и примеры приведены ниже).

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.

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, начиная с [1] (обязательно соблюдать последовательную нумерацию по тексту, не нужно выстраивать ссылки в алфавитном порядке!).

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 внутрискочные 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 подписную 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.

Сведения об авторе помещаются в конце статьи на русском и английском языках и оформляются в следующей последовательности:

– фамилия, имя, отчество (полностью);

– ученая степень, звание;

– должность, место работы;

– e-mail;

– номер телефона;

– адрес для переписки (для иногородних).

В сведениях об авторах нельзя использовать аббревиатуры и сокращения.

Статьи рецензируются. Отклоненные материалы не возвращаются

Оформление библиографических ссылок в романском алфавите (references)

1. Не использовать разделительные знаки: /; //; –.
2. Следовать правилам, позволяющим легко идентифицировать 2 основных элемента описаний – авторы и источники.
3. Не перегружать ссылки транслитерацией* заглавий статей либо давать их совместно с переводом.
4. Придерживаться единой системы транслитерации фамилий авторов, заглавий статей (если их включать) и названий источников (<http://translit.ru/>, выбрать **BGN**).
5. При ссылке на статьи из российских журналов, имеющих переводную версию, лучше давать ссылку на переводную версию статьи.

Название источника, независимо от того, журнал это, монография, сборник статей или название конференции, *выделяется курсивом*. Дополнительная информация – перевод на английский язык названия источника приводится в круглых скобках шрифтом, используемым для всех остальных составляющих описания.

Примеры описаний **статей из российских журналов** (фамилии авторов в транслитерации, название журнала в транслитерации курсивом, год, №, страницы. Название статьи опускается):

Dyachenko V. D., Krivokolysko S. G., Nesterov V. N. *Khim. Geterotsikl. Soedin.*, 1996, no. 9, p. 1243.

Polyanchikov Yu. N., Bannikov A. I. *Vestnik SibGAU*. 2007, no. 1 (23), p. 21–24.

Статьи из электронных журналов описываются аналогично печатным изданиям с дополнением данных об адресе доступа. Пример описания статьи из электронного журнала:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange, *Journal of Computer- Mediated Communication*, 1999, vol. 5, no. 2, available at: [www. ascusc.org/ jcmc/vol5/ issue2/](http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/)

Наиболее точную идентификацию статей из электронных журналов можно получить, если указать уникальный идентификатор, который используют практически все ведущие зарубежные журналы для идентификации своих статей (Digital Object Identifier – DOI), в том числе и российские переводные журналы. Система DOI является международным ISO стандартом (<http://www.doi.org/>). Поэтому при наличии в статье DOI, в списке литературы желательно указывать ее идентификатор. Примеры описания статей из SCOPUS, имеющих DOI:

Yang S. Y., Ryu I., Kim H. Y., Kim J. K., Jang S. K., Russell T. P. Nanoporous membranes with ultrahigh selectivity and flux for the filtration of viruses (2006) *Advanced Materials*, 18 (6), p. 709–712. Cited 89 times. doi: 10.1002/adma.200501500.

Zhang Z., Zhu D. Experimental research on the localized electrochemical micromachining (2008) *Russian Journal of Electrochemistry*, 44 (8), pp. 926-930. Cited 2 times. doi: 10.1134/S1023193508080077.

Материалы конференций:

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Muhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing [Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma Cove resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i*

* Транслитерация – перевод одной графической системы алфавита в другую (то есть передача букв одной письменности буквами другой). Пример Т.: немецкий Schiller – русский «Шиллер».

povysheniya neftegazootdachi” (Proc. 6th Int. Technol. Symp. “New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact”). Moscow, 2007, p. 267–272.

Главное в описаниях конференций – название конференции на языке оригинала (в транслитерации, если нет ее английского названия), выделенное курсивом. В скобках дается перевод названия на английский язык. Выходные данные (место проведения конференции, место издания, страницы) должны быть представлены на английском языке.

Возможен и такой сокращенный вариант:

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Muhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma “ovye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi*” (Proc. 6th Int. Technol. Symp. “New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact”). Moscow, 2007, pp. 267–272.

В переводных журналах ссылки на публикации в материалах конференций даются либо вообще без их заглавий докладов, либо приводится только их перевод. Примеры ссылок на публикации в материалах конференций:

Antina E. V., Berezin M. B., Semeikin A. S., Dudina N. A., Yutanova S. L., and Guseva G. B. Abstracts of Papers, *XII Molodezhnaya konferentsiya po organicheskoi khimii* (XII Youth Conference on Organic Chemistry), Suzdal, 2009, p. 248.

Iznairov B. M. *Obespechenie ratsional'nykh geometricheskikh parametrov mnogozvennykh soedinenii i rezervirovanie ikh elementov* (Rational Geometric Parameters of Multicomponent Joints and Backup of Their Components), Saratov: SGTU, 2008.

Riabinina A. A., Berezina E.V. *Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Reshetnevskie chteniya”* (Materials XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy conference Reshetnev reading), Krasnoyarsk, 2010, p. 100–115.

Книги (монографии, сборники, материалы конференций в целом):

Belaya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur i nanokompozitov v Rossiiskoi Federatsii (po materialam Pervogo Vserossiiskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditelei v oblasti nanotekhnologii (White Book in Nanotechnologies: Studies in the Field of Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites in the Russian Federation: Proceedings of the First All-Russian Conference of Scientists, Engineers and Manufacturers in the Field of Nanotechnology). Moscow, LKI, 2007.

Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'tvo SSSR* (Last government of the USSR). Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union (*Ot katastrofy k vrozozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR*). Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Kanevskaya R. D. *Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov* (Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development). Izhevsk, 2002. 140 p.

Latyshev, V.N., *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanie metallov* (Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting), Ivanovo: Ivanovskii Gos. Univ., 2009.

Ссылка на Интернет-ресурс:

APA Style (2011), Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 5 February 2011).

Pravila Tsitirovaniya Istochnikov (Rules for the Citing of Sources) Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed 7 February 2011).

На сайте издательства Emerald даны достаточно подробные рекомендации по составлению пристатейных списков литературы по стандарту Harvard (Harvard reference system) практически для всех видов публикаций – <http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/harvard.htm?part=2>, а также программные средства для их формирования. Можно воспользоваться этими рекомендациями.