

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
БЕЛОРУССКАЯ ЖЕЛЕЗНАЯ ДОРОГА  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

*Посвящается 50-летию  
электротехнического факультета*

# ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ

МАТЕРИАЛЫ  
X МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
(Гомель, 26–27 ноября 2020 г.)

Часть 1

Под общей редакцией *Ю. И. КУЛАЖЕНКО*

Гомель 2020

УДК 656.08  
ББК 39.18  
П78

Редакционная коллегия:

**Ю. И. Кулаженко** (отв. редактор), **Ю. Г. Самодум** (зам. отв. редактора),  
**А. А. Ерофеев** (зам. отв. редактора), **Т. М. Маруняк** (отв. секретарь),  
**Д. И. Бочкарев, К. А. Бочков, Т. А. Власюк, И. А. Еловой, Д. В. Леоненко,**  
**В. Я. Негрей, В. М. Овчинников, А. А. Поддубный, А. В. Пулято, А. Г. Ташкинов**

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор **В. В. Кобищанов**  
(Брянский государственный технический университет);  
доктор технических наук, профессор **Ю. О. Пазойский**  
(Московский государственный университет путей сообщения)

**Проблемы безопасности на транспорте** : материалы X Междунар.  
П78 науч.-практ. конф. (Гомель, 26–27 ноября, 2020 г.) : в 5 ч. Ч. 1 / М-во  
трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т  
трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 145 с.  
ISBN 978-985-554-942-1 (ч. 1)

Рассматриваются информационная и функциональная безопасность систем автоматизации, телемеханики и связи; естественные науки в обеспечении безопасности транспортных систем.

Для ученых, преподавателей учебных заведений транспортного профиля, научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций, предприятий и учреждений транспорта и строительства.

**УДК 656.08**  
**ББК 39.18**

ISBN 978-985-554-942-1 (ч. 1)  
ISBN 978-985-554-941-4

© Оформление. БелГУТ, 2020

## **УВАЖАЕМЫЕ УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ!**

*От имени организационного комитета приветствую вас на юбилейной X Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте».*

*Обеспечение безопасности является необходимым условием эффективного функционирования транспортного комплекса. Для решения задач по данной проблематике необходимо сотрудничество ученых и специалистов в различных областях деятельности. Программа конференции направлена на обсуждение широкого круга вопросов по безопасности транспортных систем, пассажирских перевозок, надежности подвижного состава, систем автоматики, телемеханики и связи, транспортной инфраструктуры, строительного комплекса, экологической, энергетической и экономической безопасности, транспортной безопасности при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций, фундаментальным научным исследованиям в области безопасности транспортных систем, что позволит найти комплексные, эффективные решения сложнейших задач в области безопасности на транспорте.*

*Несмотря на сложную эпидемиологическую ситуацию в мире в этом году отмечается рекордный интерес к конференции – в очной и дистанционной формах в работе конференции принимает участие около 500 докладчиков. Запланирована работа 10 секций.*

*Данное мероприятие является хорошей возможностью ознакомить участников с научными достижениями ученых и специалистов, передовыми производственными технологиями, а также установить новые научно-производственные связи с учеными и специалистами из разных стран. Мы рады приветствовать на нашей конференции ученых из Беларуси, Азербайджана, Болгарии, Германии, Казахстана, Китая, Литвы, России, Словакии, Узбекистана, Украины, Эстонии.*

*По уже сложившейся за многие годы традиции конференция «Проблемы безопасности на транспорте» проводится при поддержке Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь и Белорусской железной дороги. По нашему мнению, такое сотрудничество, активный диалог между учеными и практиками по проблемам безопасности позволит сформулировать новые подходы и найти эффективные решения актуальных задач обеспечения безопасности в транспортном комплексе.*

*Благодарю вас за участие в работе конференции, желаю всем успехов в решении научных и производственных задач, личного счастья, крепкого здоровья, безопасного настоящего и будущего.*

**Ю. И. КУЛАЖЕНКО,**

**председатель организационного комитета конференции,  
ректор Белорусского государственного университета транспорта,  
доктор физико-математических наук**

## К 50-ЛЕТИЮ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА БелИИЖТа-БелГУТа

*Ф. Е. САТЫРЕВ, В. Г. ШЕВЧУК*

Обеспечение безопасности движения поездов в условиях повышения их скоростей, четкое и своевременное выполнение технологических процессов на железной дороге немислимы без современных сложных систем управления и контроля, а следовательно, и без наличия хорошо подготовленных инженеров по их обслуживанию. Для решения задач подготовки инженерных кадров по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» 1 сентября 1970 года в Белорусском институте инженеров железнодорожного транспорта был открыт электротехнический факультет. Первым деканом факультета стал Почетный железнодорожник, канд. техн. наук, доцент А. В. Бессоненко, руководивший факультетом в течение 16 лет (1970–1986). В связи со строительством и вводом в эксплуатацию третьего, а затем и четвертого учебных корпусов БелИИЖТа преподавателями, сотрудниками и студентами факультета при материальной и технической поддержке Белорусской железной дороги была проведена гигантская работа по созданию самой современной по тем временам учебно-лабораторной базы.

С первых дней на факультете внимание стали уделять кадровой политике. Профессорско-преподавательский состав кафедр стал формироваться как сплав опытных производственников (участник Великой Отечественной войны, Почетный железнодорожник, канд. техн. наук, доцент П. Я. Корнеев; канд. техн. наук, доцент Н. Ф. Семенюта, до этого возглавлявший родственную кафедру в Ташкентском институте инженеров железнодорожного транспорта, а впоследствии Почетный профессор БелГУТа, Почетный железнодорожник, академик МАС; доцент Т. В. Мирошниченко, работавшая заместителем начальника Гомельской дистанции сигнализации и связи; доцент Л. П. Воронцова; участники Великой Отечественной войны: полковник Е. Ф. Макаров-Землянский, полковник Н. И. Пешко, полковник А. А. Подоленко, подполковник Е. В. Мясников, В. Ф. Крупский, В. Д. Потапенко; житель блокадного Ленинграда Л. М. Леонова; Г. А. Шадрина; канд. техн. наук, доцент Н. К. Модин – опытный специалист по автоматизации сортировочных горок – и др.) и лучших молодых выпускников ЛИИЖТа (А. Н. Коврига и В. Н. Фомичев), ХИИТа (А. Н. Савельев и М. В. Нафтольский), а впоследствии и родного факультета (К. А. Бочков, В. Г. Шевчук, В. С. Смоленчук, В. С. Кострома, Т. В. Кострома, Ф. Е. Сатырев, С. А. Бессоненко, А. Н. Семенюта и др.).

За прошедшие 50 лет факультет подготовил около 4000 инженеров-электриков, которые успешно трудились и трудятся как в Республике Беларусь, так и в других странах: Российской Федерации, Украине, Латвии, Литве, Эстонии, Армении, Казахстане, Туркменистане, Грузии, США, Канаде, Германии, Швейцарии, Австралии, Израиле, Ливане, Йемене и др.

Среди выпускников факультета: С. С. Сидорский – Премьер-министр Республики Беларусь (2003–2010); В. Н. Шубадеров – главный инженер Белорусской железной дороги; А. П. Сергиенко – начальник Службы внешних связей Белорусской железной дороги; В. С. Воронин, работавший начальником Департамента МПС РФ; С. А. Бессоненко – член РАЕН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление эксплуатационной работой» Сибирского государственного университета путей сообщений; Ю. Ф. Бородич – генерал-майор; К. А. Бочков – Почетный железнодорожник, д-р техн. наук, профессор, руководитель научно-исследовательской лабораторией «Безопасность и электромагнитная совместимость технических средств»; Д. В. Ермоленко – д-р техн. наук, заведующий аспирантурой АО «ВНИИЖТ» Российской Федерации; А. Н. Семенюта – д-р техн. наук профессор, заведующий кафедрой информационно-вычислительных систем Белорусского торгово-экономического университета потребительской кооперации; М. А. Чернин – заместитель начальника Департамента технической политики (ЦТех) ОАО «Российские железные дороги», Почетный железнодорожник, лауреат премии имени Черепановых – и многие другие.

Ныне электротехнический факультет переживает вторую молодость: благодаря помощи, оказанной Белорусской железной дорогой, отремонтированы и переоснащены современным техническим оборудованием учебные лаборатории факультета. Коллектив факультета с уверенностью смотрит в будущее, готовит новые кадры инженеров-электриков.

## **УВАЖАЕМЫЕ УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ!**

*Приветствую вас на юбилейной X Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте».*

*Обеспечение безопасности движения было и остается одним из приоритетных направлений деятельности Белорусской железной дороги. Безопасность движения всегда являлась главным индикатором качества перевозочного процесса. За прошедшие годы в этом направлении проделана огромная работа, а многие полученные в ходе обсуждений на предыдущих конференциях результаты уже реализованы на практике.*

*Однако время не стоит на месте. Белорусская железная дорога активно внедряет инновации в свою деятельность: продолжается электрификация железнодорожных участков, вводится в эксплуатацию инновационный подвижной состав, повышаются скорости движения пассажирских и грузовых поездов, на станциях, в дистанциях и депо внедряются новые технологии и технические средства, расширяется использование информационно-коммуникационных и интеллектуальных систем. В связи с этим вопросы обеспечения безопасности транспортных процессов выходят на новый уровень, требуют новых организационных, технических и технологических решений, изменения качественного подхода к теоретической и практической подготовке сотрудников.*

*Международная научно-практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте» является хорошей возможностью для участников поделиться информацией о научных достижениях в области обеспечения безопасности движения и опытом внедрения современной техники и технологий на производственных объектах. Высокую научную значимость конференции подтверждает интерес сотен ученых из десятков вузов, предприятий и организаций Беларуси, Азербайджана, Болгарии, Германии, Казахстана, Китая, Литвы, России, Украины, Узбекистана.*

*Желаю всем участникам конференции плодотворной работы и успехов в решении задач обеспечения безопасности движения в транспортных системах.*

**В. М. МОРОЗОВ,**

*Начальник Белорусской железной дороги*

# ИНФОРМАЦИОННАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

УДК 681.322:621.391

## ЗАЩИТА ДАННЫХ В ОПЕРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*С. Н. БЕЛАН, Г. Д. КАЛЭНСКАЯ, В. Ф. ЛАКАТОШ*

*Государственный университет инфраструктуры и технологий, г. Киев, Украина*

Информационная безопасность имеет большое значение для обеспечения жизненно важных интересов любого государства и транспортных систем. Создание развитой и защищенной среды является неперенным условием развития общества и страны в целом, в основе которого должны быть новейшие автоматизированные технические средства. Важными стратегическими отраслями любого государства являются его транспортные инфраструктуры, объекты управления и учета. Для успешной и надежной организации работы таких подразделений необходима надежная защита данных, которые передаются. Особенно это касается оперативных данных. Объектом защиты в информационной системе является информация с ограниченным доступом, которая циркулирует и сохраняется в виде данных, команд, сообщений, имеющих определенную ограниченность и ценность как для ее владельца, так и для потенциального нарушителя технической защиты информации.

Информация, которая хранится на носителях может быть защищена как программными, так и аппаратными средствами, которые предотвращают доступ к средствам считывания с носителя. Существует также информация, которая передается по незащищенным каналам связи. В первую очередь это касается систем передачи данных массового пользования. В таких системах данные передаются по разным средам (электрический кабель, оптический кабель и радиоэфир). В такой ситуации информацию защищают двумя подходами: криптография и стеганография [1–3]. Первый метод характеризуется наличием сведений о зашифрованном сообщении, а второй метод характеризуется сокрытием самого факта наличия сообщения. Причем стеганография использует криптографию и скрывает заранее зашифрованное сообщение.

Существующие на данный момент стеганографические подходы используют контейнеры различной природы. Одним из таких контейнеров являются графические файлы, в байты которых записываются соответствующие биты цифрового сообщения. Причем накладываются требования относительно искажения исходного изображения. Для уменьшения видимых искажений биты цифрового сообщения записываются в младшие биты выбранных байтов файла изображения, что значительно уменьшает объем возможного сообщения и требует графических файлов большого объема. В случаях, когда используются графические контейнеры фиксированной длины необходимы разрабатывать методы увеличения объема внедряемого сообщения без видимых визуальных искажений изображений контейнеров.

Для увеличения объема внедряемого сообщения без изменений объема изображения ставится задача поиска таких зон изображения, значительные искажения которых не приводили бы к искажению общей зрительной картины. Также используется предварительное шифрование секретного сообщения, для чего используются генераторы псевдослучайных чисел (ГПСЧ), которые могут быть реализованы различными методами и средствами [4].

Генераторы псевдослучайных последовательностей являются неотъемлемыми элементами большинства систем защиты. Сфера их применения очень широка. Среди них: космическая связь; транспорт; коды, обнаруживающие и исправляющие ошибки; встроенное самотестирование ПЛИС; защита информации и др.

Качественные псевдослучайные последовательности, которые по своей сути являются детерминированными, тем не менее обладают практически всеми свойствами реализации истинно случайных процессов и успешно их заменяют. Наиболее распространены ГПСЧ, реализуемые математически и аппаратно.

В исследованиях рассматриваются методы стеганографического скрывания информации в контейнеры, представленные графическими файлами (изображениями). В изображениях контейнеров осуществляется поиск пикселей, искажение цвета которых не приводит к существенным изменени-

ям визуальной картины изображения. В коды таких пикселей можно внедрить большое количество битов секретного сообщения. Были использованы исследования, которые описаны в работах [5–7]. В этих работах на основе конструирующей стеганографии биты секретного сообщения внедряются в младшие разряды кодов специально выделенных пикселей (шумовые пиксели, краевые пиксели, пиксели, определенные с помощью пороговой обработки).

В данной работе используется оператор Собеля для выделения краевых пикселей, в двоичные коды которых внедряются биты секретного сообщения [8]. Оператор Собеля использует фрагмент изображения в виде матрицы 3×3 и организует свертку по формулам:

$$G_x = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3),$$

$$G_y = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_6).$$

Формулы описаны согласно кодировки, представленной на рисунке 1.

В коды выделенных пикселей внедряются биты зашифрованного изображения с помощью ГПСЧ. Используется ГПСЧ, построенный на клеточных автоматах с активными и неоднородными клетками [4]. Эти ГПСЧ показали высокое качество сформированных псевдослучайных битовых последовательностей. Также были исследованы различные типы окрестностей, которые были реализованы в клеточных автоматах. Анализировались локальные функции переходов и влияние дополнительных бит.

$z_1$	$z_2$	$z_3$
$z_4$	$z_5$	$z_6$
$z_7$	$z_8$	$z_9$

Рисунок 1 – Область матрицы изображения для реализации оператора Собеля

**Заключение.** В данной работе проведены исследования современных методов и средств стеганографического сокрытия информации. Разработана система стеганографической защиты информации с применением контейнеров, представленные файлами графического формата. Увеличен объем внедряемой информации за счет использования пикселей, выделенных как краевые пиксели с помощью оператора Собеля. Внедрены дополнительные меры защиты внедряемого сообщения за счет шифрования секретного сообщения с помощью ГПСЧ, реализованных на клеточных автоматах. Показано, что использование дополнительного бита, формирующего самим клеточным автоматом, дает возможность получить битовые последовательности большой длины.

#### Список литературы

- 1 **Грибунин, В. Г.** Цифровая стеганография / В. Г. Грибунин, И. Н. Оков, И. В. Туринцев. – М. : Солон-Пресс, 2002. – 272 с.
- 2 **Рябко, Б. Я.** Основы современной криптографии и стеганографии / Б. Я. Рябко, А. Н. Фионов. – 2-е изд. – М. : Горячая линия – Телеком, 2013. – 232 с.
- 3 **Конахович, Г. Ф.** Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г. Ф. Конахович, А. Ю. Пузыренко. – К. : МК-Пресс, 2006. – 288 с.
- 4 **Bilan, S.** Formation Methods, Models, and Hardware Implementation of Pseudorandom Number Generators: Emerging Research and Opportunities / S. Bilan // IGI Global. – USA. – 2017. — P. 301.
- 5 **Albdour, N.** Selection Image Points Method for Steganography Protection of Information / N. Albdour // WSEAS transactions on signal processing. – 2008. – Vol. 14. – P. 151–159.
- 6 **Bilan, M.** Research of Methods of Steganographic Protection of Audio Information Based on Video Containers. Handbook of Research on Intelligent Data Processing and Information Security Systems / M. Bilan, A. Bilan ; ed. by S. M. Bilan & Al-Zoubi, S. I. Hershey. – USA : IGI Global. – 2019. – P. 79–94.
- 7 **Albdour, N.** A Novel Methods for Image Steganography by Effective Image Points Selection / N. Albdour // Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2019. – Vol. 14, is. 5. Ser. II. – P. 06–11.
- 8 Real-time volume graphics / K. Engel [et al]. – Wellesley, Massachusetts: A K Peters, Ltd., 2006. – P. 112–114.

УДК 656.2.08

## КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*К. А. БОЧКОВ, П. М. БУЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В соответствии с Концепцией информационной безопасности Республики Беларусь, которая была утверждена Президентом Республики Беларусь 18 марта 2019 года, кибербезопасность – это

состояние защищенности информационной инфраструктуры и содержащейся в ней информации от внешних и внутренних угроз [1]. Информационная инфраструктура, согласно Концепции, – это совокупность технических средств, систем и технологий создания, преобразования, передачи, использования и хранения информации. При таком подходе понятие кибербезопасности включает в себя исключительно информационную безопасность, ограничивая рамки объекта защиты на информации и средствах, связанных с ней непосредственно.

Вместе с тем эта же Концепция указывает на то, что повсеместное функционирование объектов транспорта с автоматизированными системами управления ставит в прямую зависимость жизнь и здоровье населения, экологическую и социальную безопасность от их надежности и защищенности [1]. Но безопасность людей, социальной и экологической сферы не является объектом информационной защиты. Очевидно, что методы и средства, обеспечивающие информационную безопасность, не в силах решить эти задачи. Особенно это актуально для автоматизированных систем управления ответственными технологическими процессами (АСУ ОТП), которые широко применяются на железнодорожном транспорте. Основную роль в обеспечении безопасности движения поездов выполняют системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ). Такие системы в своем составе используют информационную инфраструктуру и на них должны выполняться мероприятия по обеспечению информационной безопасности. Но в таких системах не информация должна являться главным объектом защиты, а, в случае железнодорожного транспорта, безопасность движения поездов. Атака на информационную инфраструктуру и/или на информацию при обнаружении будет заблокирована, но если она не будет обнаружена (например, действия нарушителя будут признаны законными) или будет направлена исключительно на технологический процесс в обход информационной инфраструктуры (например, электромагнитный терроризм), то могут пострадать люди или может быть нанесен вред окружающей среде. В таком случае актуальными становятся вопросы функциональной безопасности. Здесь под функциональной безопасностью следует понимать совокупность таких условий функционирования АСУ ОТП, при которых предотвращаются или минимизируются последствия от внешних или внутренних деструктивных информационных воздействий, приводящих к появлению опасных отказов.

Концепция информационной безопасности Республики Беларусь делает шаг в сторону функциональной безопасности в понятии кибератаки. Кибератака – целенаправленное воздействие программных и (или) программно-аппаратных средств на объекты информационной инфраструктуры, сети электросвязи, используемые для организации взаимодействия таких объектов, в целях нарушения и (или) прекращения их функционирования и (или) создания угрозы безопасности обрабатываемой такими объектами информации [1].

Однако для АСУ ОТП остается открытым вопрос о взаимодействии информационной и функциональной безопасности. Исследования, представленные в источнике [2], предлагают трехмерную модель, которая помимо информационной и функциональной безопасности в качестве третьей составляющей кибербезопасности учитывает физическую безопасность (системы разграничения доступа). Такой подход характерен для классического понимания информационной безопасности, предложенного Джерри Зальцером и Майклом Шредером в 1975 году и включающего только конфиденциальность, доступность и целостность информации (триада CIA или КДЦ). Однако использование других моделей информационной безопасности (например, гексады Паркера, в которой дополнительно вводятся понятия владения,

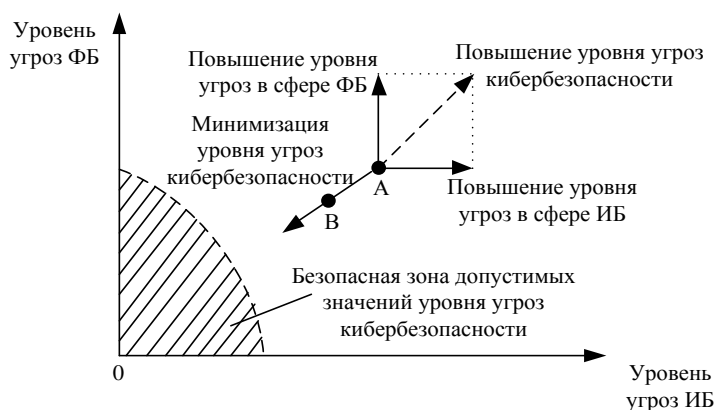


Рисунок 1 – Двухмерная модель кибербезопасности АСУ ОТП железнодорожного транспорта

аутентичности и полезности информации) позволяет включить системы разграничения доступа в область ответственности информационной безопасности. Для Республики Беларусь можно считать, что с 2019 года Концепцией информационной безопасности к понятиям конфиденциальности, доступности и целостности дополнительно вводятся подлинность и сохранность информации.

При таком подходе можно говорить о двухмерной модели кибербезопасности (рисунок 1).



Точка, представленная на графике (см. рисунок 1), описывает киберугрозу, при которой нарушается как информационная, так и функциональная безопасность.

Исходя из этой двухмерной модели обеспечение кибербезопасности заключается в соотношении угроз в сферах информационной и функциональной безопасности. При этом, для систем обеспечения безопасности движения поездов, к которым относятся современные микроэлектронные СЖАТ на основе аппаратно-программных комплексов (АПК), преобладающим является обеспечение функциональной безопасности. Кроме того, необходимо учитывать целостность и подлинность технологической информации, циркулирующей в АПК СЖАТ, которая может быть недопустимо искажена при электромагнитных атаках или других видах кибератак.

Выполненные в НИЛ «Безопасность и электромагнитная совместимость технических средств» Белорусского государственного университета транспорта исследования позволяют минимизировать последствия воздействия кибератак за счет дополнения микропроцессорной централизации системой поддержки принятия решений (СППР) дежурным по станции в нештатных ситуациях. Разработаны методы анализа и прогнозирования устойчивости микроэлектронных СЖАТ от воздействия сверхширокополосных импульсов помех (преднамеренных электромагнитных атак). Это позволяет на стадии разработки определять зоны концентрации недопустимых уровней помех вблизи неоднородностей корпусов (экранов) устройств СЖАТ, где не рекомендуется размещать критичные к безопасности элементы систем.

#### Список литературы

1 О Концепции информационной безопасности Республики Беларусь: постановление Совета безопасности Республики Беларусь, 18 марта 2019 г., № 1 // ЭТАЛОН. Законодательство Респ. Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. [Электронный ресурс]. – Минск, 2019.

2 **Безродный, Б. Ф.** Отличительные особенности кибербезопасности АСУТП / Б. Ф. Безродный // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 5. – С. 52–54.

УДК 656.2.08

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*П. М. БУЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Отрасль железнодорожного транспорта в настоящее время находится на стадии активного внедрения инфокоммуникационных систем. Компьютерные сети, цифровые каналы связи, облачные технологии и сервисы, программное обеспечение осваиваются отраслью для оказания услуг пассажирам и выполнения технологических процессов. Все эти современные средства и технологии позволяют Белорусской железной дороге идти в ногу со временем и поступательно участвовать в информатизации отрасли, что дает возможность достигнуть ожидаемого синергетического эффекта от синхронной информатизации всех отраслей народного хозяйства Республики Беларусь.

Кибербезопасность – состояние защищенности инфокоммуникационной системы и содержащейся в ней информации от внешних и внутренних угроз. Состояние защищенности нарушается посредством кибератак. Кибератака – целенаправленное воздействие программных и (или) программно-аппаратных средств на инфокоммуникационную систему в целях нарушения и (или) прекращения ее функционирования и (или) создания угрозы безопасности обрабатываемой такой системой информации [1].

Таким образом, понятие кибербезопасности включает в себя защищенность информации, которая обрабатывается инфокоммуникационной системой (информационная безопасность), так и защищенность процесса функционирования самой инфокоммуникационной системы (функциональная безопасность). Причем для железнодорожного транспорта вторая составляющая кибербезопасности является более актуальной. Это связано с тем, что часть автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) железнодорожного транспорта вообще могут не использовать информацию предоставление и (или) распространение которой ограничено, и при этом выполнять задачи, связанные с безопасностью грузо- и пассажироперевозок. Для таких систем мероприятия по обеспечению информационной безопасности фактически сводятся к функциям разграничения доступа и аудита выполняемых пользователем АСУ ТП операций.

В настоящее время неуклонно растет количество киберпреступлений, инфокоммуникационные системы становятся как предметом таких преступлений, так и средством их совершения. В даль-

нейшей перспективе намечается формирование тотальной зависимости отрасли железнодорожного транспорта от защищенности инфокоммуникационных систем.

В пункте 60 Концепции информационной безопасности Республики Беларусь сказано, что ни в глобальном, ни в региональном масштабах пока не удастся эффективно воспрепятствовать разработкам и распространению средств, заведомо предназначенных для уничтожения, блокирования, модификации, похищения информации в сетях и ресурсах или нейтрализации мер по ее защите. Вместе с тем, к сожалению, построить абсолютно адекватную систему защиты не представляется возможным. Особенно, если затраты на ее организацию и сопровождение не должны превышать предполагаемый ущерб от ее нарушения в результате реализации угроз.

Вместе с тем в Концепции информационной безопасности указано, что повсеместное функционирование объектов транспорта с автоматизированными системами управления ставит в прямую зависимость жизнь и здоровье населения, экологическую и социальную безопасность от их надежности и защищенности [1].

К сожалению проанализировать статистику инцидентов в сфере кибербезопасности отрасли железнодорожного транспорта Республики Беларусь не представляется возможным в силу крайней редкости появления таких инцидентов (хочется верить) и ограниченности информации о таких событиях в открытых источниках из-за специфики отрасли. Однако есть объективная статистика таких инцидентов, которая предоставляется компаниями, занимающимися вопросами кибербезопасности. Одна из таких компаний – это АО «Лаборатория Касперского», программный продукт которой сертифицирован в Республике Беларусь и применяется в подразделениях Белорусской железной дороги для защиты инфокоммуникационных систем. За последние несколько лет Республика Беларусь достаточно часто была замечена в бюллетенях, которые эта компания ежегодно выпускает с анализом статистики инцидентов кибербезопасности [2–4].

Так, в 2017 и 2018 годах наша страна была на втором месте среди стран, в которых пользователи подвергались наибольшему риску заражения через сеть Интернет. В 2019 году по данному показателю она переместилась на 9-е место в мире. Среди стран, в которых компьютеры пользователей подвергались наибольшему риску локального заражения, Республика Беларусь в 2018 году занимала 17-е место. По сравнению с соседними странами пользователи электронных банковских систем Республики Беларусь чаще подвергались атакам в 2017 и 2019 году. В 2018 и 2019 годах компьютеры белорусских пользователей также чаще атаковались программами-майнерами.

Таким образом, в рамках информатизации, отрасль железнодорожного транспорта находится в серьезной опасности с точки зрения кибербезопасности. Для повышения уровня кибербезопасности отрасли необходимо решить следующие задачи:

1 Сформулировать цели и задачи в сфере кибербезопасности железнодорожного транспорта.

2 Проводить мониторинг инцидентов кибербезопасности отрасли. Оценивать уровень кибербезопасности Белорусской железной дороги. Обмениваться опытом обеспечения кибербезопасности с другими организациями Республики Беларусь.

3 Снизить зависимость Белорусской железной дороги от импортных инфокоммуникационных технологий и систем защиты информации. Устранить неконтролируемое их использование в системах, отказ или разрушение которых может причинить ущерб кибербезопасности.

4 Готовить кадры для Белорусской железной дороги, которые будут знакомы с принципами обеспечения кибербезопасности и понимающими необходимость и значимость данных мероприятий, а также повышать квалификацию сотрудников Белорусской железной дороги в данной сфере.

#### Список литературы

1 О Концепции информационной безопасности Республики Беларусь : постановление Совета безопасности Республики Беларусь, 18 марта 2019 г., № 1 // ЭТАЛОН. Законодательство Респ. Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь: [Электронный ресурс]. – Минск, 2019.

2 Kaspersky Security Bulletin: Статистика 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://securelist.ru/ksb-overall-statistics-2017/88203/>. – Дата доступа: 11.09.2020.

3 Kaspersky Security Bulletin 2018. Статистика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://securelist.ru/kaspersky-security-bulletin-2018-statistics/92906/>. – Дата доступа: 11.09.2020.

4 Kaspersky Security Bulletin 2019. Статистика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://securelist.ru/kaspersky-security-bulletin-2019-statistics/95264/?utm\\_source=securelist&utm\\_medium=blog&utm\\_campaign=ru\\_ksb-stats\\_ay0073&utm\\_content=banner&utm\\_term=ru\\_securelist\\_ay0073\\_banner\\_blog\\_ksb-stats](https://securelist.ru/kaspersky-security-bulletin-2019-statistics/95264/?utm_source=securelist&utm_medium=blog&utm_campaign=ru_ksb-stats_ay0073&utm_content=banner&utm_term=ru_securelist_ay0073_banner_blog_ksb-stats). – Дата доступа: 11.09.2020.

5 Курило, А. Как нам реорганизовать ИБ / А. Курило // BIS Journal – Информационная безопасность банков. – 2020. – № 3 (38). – С. 14–21.

## ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

С. В. БУШУЕВ, А. Н. ПОПОВ

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург,  
Российская Федерация

Участки железных дорог по пропускной способности распределены неравномерно. Имеются участки, где пропускная способность практически исчерпана и наблюдается ее дефицит. Повышение пропускной способности на таких участках возможно за счет развития инфраструктурного комплекса: строительство новых путей станций и перегонов, совершенствование устройств электрооборудования, устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Для существующих путей станций и перегонов повысить пропускную способность возможно за счет сокращения интервала попутного следования между поездами. Минимальный интервал следования выбирается как интервал на участке пути, по которому поезда проходят с наиболее низкими скоростями. На перегонах, оборудованных автоблокировкой с трехзначной сигнализацией, из условия движения на зеленый огонь минимальный интервал определяют при трехблочном разграничении поездов. В целях безопасности движения поездов расстановка сигналов автоблокировки выполняется так, чтобы длина каждого блок-участка была не менее тормозного пути наиболее быстрого поезда, но не менее 1000 м.

Таким образом, значения минимального интервала следования по перегону по условиям безопасности ограничены длиной тормозных путей поездов. Технические решения для вождения поездов на расстоянии тормозного пути не тиражируются на сети дорог, находятся на стадии исследований и разработок.

Традиционные системы автоблокировки предусматривает для торможения поезда расстояние не менее двух длин блок-участков. В эксплуатации остановка поезда, следующего по сигналам автоблокировки, выполняется в два этапа: снижение скорости при смене кодовой комбинации «З» на «Ж» ниже 60 км/ч и полная остановка при смене кода «Ж» на «КЖ» перед светофором с запрещающим показанием. Кривая скорости с регистратора бортового локомотивного комплекса, описывающая процесс торможения поезда, приведена на рисунке 1.

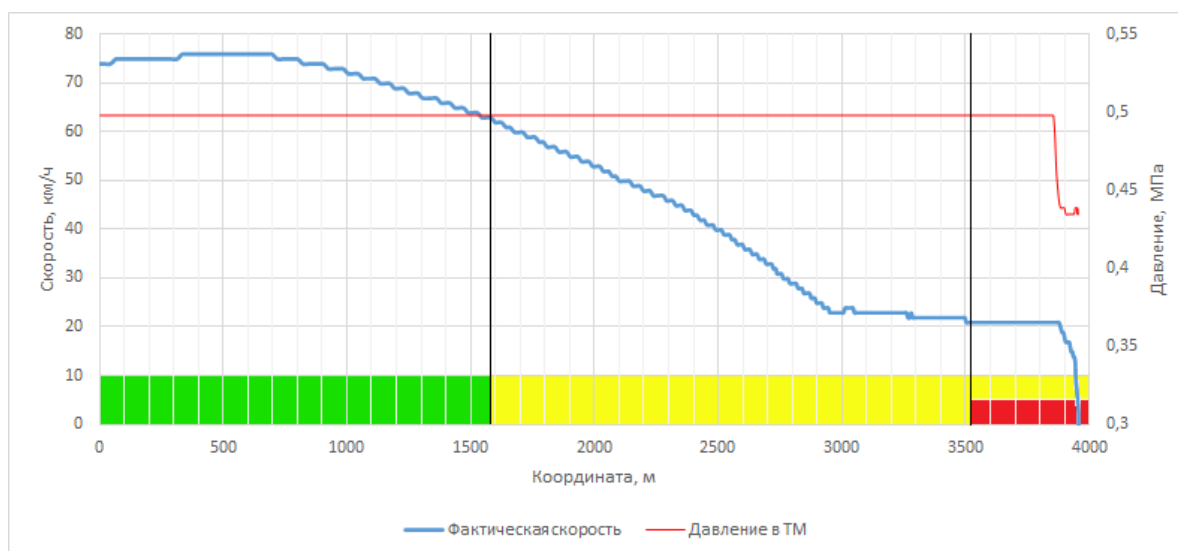


Рисунок 1 – Остановка поезда при автоблокировке

Снижение скорости поезда при смене кодов с «З» на «Ж» осуществляется без применения торможения за счет действия сил сопротивления движению при выключенной тяге. Торможение включается для остановки поезда только перед светофором с горящим красным огнем при невысокой скорости движения.

Существующие способы, позволяющие сократить интервал следования поездов относительно традиционной автоблокировки, сводятся к сокращению расстояния за счет уменьшения длины блок-участка или уменьшения числа блок-участков между поездами.

Число блок-участков между поездами может быть сокращено при повышении верхнего порога снижения скорости для сигнального показания «Ж». При этом на сигнал «Ж» поезда будут двигаться по перегону так же, как при показании «З». Трехблочное разграничение поездов заменяется на двухблочное.

Уменьшить длину блок-участка возможно при применении систем автоблокировки на основе тональных рельсовых цепей, организовав так называемые подвижные блок-участки. Системой, позволяющей реализовать данный способ, является микропроцессорная автоблокировка АБТЦ-М, которая принята к тиражированию на сети железных дорог РФ [1].

Реализовать минимальный интервал следования по перегонам позволяет вождение поездов по технологии виртуальной сцепки [2].

Требуемый интервал попутного следования должен быть обеспечен не только для перегонов, но и для станций. Отличия станций от перегонов заключаются в наличии стрелок по маршруту движения, а длины рельсовых цепей на станциях не связаны с длинами тормозных путей. Станции имеют увеличенные, по сравнению с перегонами, интервалы по приему и отправлению поездов.

При соответствующей установке стрелок в маршруте главные пути станции, можно рассматривать как продолжение перегонных. Организации движения через станции как по перегонам, препятствуют показания станционных светофоров. Имеются решения, в которых поездные станционные светофоры оборудуются специальным сигнальным показанием, информирующим машиниста о том, что они исправны, а движение по станции следует выполнять по сигналам автоматической локомотивной сигнализации.

Достижение уменьшения интервалов по приему и отправлению поездов возможно при устройстве путей разгона поездов при отправлении со станции.

Вопрос повышения пропускной способности за счет применения рассмотренных технических средств и технологий изучен недостаточно. Для исследования возможности повышения пропускной способности требуется выполнить моделирование движения поездов с учетом ограничений, накладываемых конфигурацией путей перегонов и станций, а также применяемых технологий регулирования движения поездов.

Все указанные методы теоретически позволяют повысить показатели перевозочного процесса. Из опыта эксплуатации известно, что фактические показатели могут серьезно отличаться от расчетных. Поэтому для повышения точности определения показателей применяют имитационное моделирование. Используя методы имитационного моделирования, можно определить, на сколько необходимо сократить интервал попутного следования между поездами, чтобы увеличить пропускную способность на заданное значение относительно имеющейся для загруженного участка.

Для исследования процессов разгона и торможения разработаны модели движения поезда. В модели, получившей наибольшее распространение, поезд, сформированный из локомотива и вагонов, рассматривают как материальную точку (центр масс поезда), имеющую массу  $m$  и движущуюся под воздействием алгебраической суммы сил, каждая из которых является функцией скорости движения: силы тяги  $F(v)$ , силы сопротивления движению  $W(v)$ , силы торможения  $B(v)$ . При моделировании удобно пользоваться удельными силами.

В соответствии со вторым законом Ньютона запишем уравнение движения поезда:

$$(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} = f(v) - w(v) - b(v), \quad (1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий инерцию вращающихся частей;  $f(v)$  – удельная сила тяги;  $w(v)$  – удельная сила сопротивления движению;  $b(v)$  – удельная сила торможения.

Для решения уравнения (1) наибольшее распространение получил метод Эйлера, который прост в использовании и позволяет получить приемлемую точность расчетов при малых шагах интегрирования. Интегрирование уравнения может осуществляться по пути, времени и по скорости [3].

Проведенные исследования подтверждают наличие имеющихся возможностей для повышения пропускной способности железнодорожных участков. Наибольшая эффективность рассмотренных решений достигается при изменении технологии управления движением поездов.

#### Список литературы

- 1 **Воронин, В. А.** АЛСО с подвижными блок-участками / В. А. Воронин, В. В. Воробьев, С. Н. Есырев // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 6. – С. 44–45.
- 2 **Розенберг, Е. Н.** Принципы построения систем управления и интервального регулирования движением поездов четвертого поколения / Е. Н. Розенберг / Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019) : тр. Восьмой науч.-техн. конф. – 2019. – С. 27–32.
- 3 Оптимизация управления движением поездов : учеб. пособие / Л. А. Баранов [и др.] ; под ред. Л. А. Баранова. – М. : МИИТ, 2011. – 164 с.

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

*В. Н. ГАЛУШКО, И. Л. ГРОМЫКО*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В процессе функционирования электроэнергетической системы (ЭС) могут возникать повреждения, чаще всего короткие замыкания (КЗ), сопровождаемые увеличением токов через отдельные элементы ЭС. Без принятия специальных мер эти режимы могут привести к повреждению электрооборудования и нарушению электроснабжения.

По результатам анализа существующей установленной релейной защиты на СТП-206 можно сделать следующие выводы:

1 РЗА питающей линии 825 В СТП-206, «Немига», выполненная на аналоговых электромеханических реле, физически и морально устарела. РЗА эксплуатируется выше нормативного срока службы 12 лет. Количество срабатываний устройств РЗА превышает нормируемое значение.

2 Технические характеристики и функциональные возможности установленных электромеханических реле не соответствуют требуемому уровню быстродействия, чувствительности, обеспечения селективности прилегающей электрической сети.

3 Растет число повреждений элементов релейной защиты, выявленных при техническом обслуживании и анализе случаев неправильного срабатывания устройств питающей линии.

4 Происходит прекращение выпуска электромеханических устройств релейной защиты и запасных частей к ним, что приводит к трудностям при проведении технического обслуживания устройств релейной защиты.

В настоящее время в белорусской энергетике парк комплектных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в основном состоит из электромеханических устройств. При этом специалистам известно, что безотказность защиты электрооборудования, обеспечиваемая применением электромеханических и полупроводниковых панелей, составляет 97,0–98,2 %, а при использовании микропроцессорных РЗА – 98,6–99,2 %. Причем причиной неправильной работы устройств являются ошибки эксплуатационного персонала – 33,9 %. Дефекты и неисправности аппаратуры приводят к сбоям в 24,4 % (доля дефектов электромеханических устройств – 19,1 %, а микроэлектронных и полупроводниковых – 5,3 %). Очевидно, что важность выполняемых устройствами РЗА функций по обеспечению локализации повреждений и предотвращению развития аварий в энергосистемах обуславливает необходимость скорейшего технического перевооружения систем РЗА на основе применения микропроцессорных устройств [1].

Кроме того, все терминалы защит подключаются к системе SCADA, на которой отображается вся схема подстанции, значения нагрузок по каждому присоединению, напряжение на шинах подстанции, а также фиксация в реальном времени возникших аварийных ситуаций. Синхронизация систем SCADA подстанций с диспетчерским пунктом позволяет дежурному диспетчеру своевременно фиксировать возникшие аварийные ситуации, контролировать процесс переключений оперативного персонала. Перед выдачей разрешения на допуск бригады для проведения плановых работ дежурный диспетчер, благодаря системе SCADA, может лично убедиться в правильности и достаточности принятых мер безопасности.

Однако у микропроцессоров существует проблема влияния внешних электромагнитных излучений, а также они требуют обновления программного продукта, который устаревает гораздо быстрее, чем техника.

Статистика показывает, что более 30 % всех отказов устройств релейной защиты связано с ошибками персонала. При имеющейся тенденции к сокращению обслуживающего персонала одним из путей решения вопроса является расширение использования автоматических средств проверки, что сокращает как время и затраты на проверку, так и возможные ошибки при проверке, выполняемой по заданной программе в автоматическом режиме. Одновременно повышается и достоверность результатов, фиксируемых итоговым документом – протоколом испытаний, создаваемым самой программой. Существенно облегчаются последующие периодические проверки.

Аппаратура фидерной защиты и автоматики (АФЗА) является модернизированной версией аппаратуры защиты (АЗМ2). Аппаратура фидерной защиты и автоматики (АФЗА) предназначена для эксплуатации в составе комплектного распределительного устройства совместно с быстродействующим выключателем (БВ) на тяговых подстанциях городского транспорта постоянного тока напряжением до 1,0 кВ (0,825 кВ для метрополитена и 0,630 кВ для трамвая, троллейбуса).

АФЗА используется в качестве основной защиты фидера, дополнительно к используемой защите БВ, осуществляемой реле дифференциальным шинным (РДШ).

Система мониторинга и защиты тяговой сети серии SMTN-3 предназначена для применения в качестве устройства защиты тяговой сети от токов короткого замыкания и недопустимых перегрузок, мониторинга параметров тяговой сети, применения в качестве устройства накопления данных для последующего анализа произошедших аварийных процессов.

SMTN-3 используются в распределительных устройствах (РУ) тяговых подстанций городского транспорта, метрополитена, электрифицированных железных дорог, промышленных предприятий, а также для предприятий горнодобывающей промышленности. Устройство не включает в себя функцию АУВ, поэтому подразумевается использование совместно с уже существующей схемой управления и АПВ выключателя или с отдельным терминалом АУВ. Устройство является комбинированным микропроцессорным устройством релейной защиты. Применение в устройстве модульной микропроцессорной архитектуры наряду с современными технологиями поверхностного монтажа обеспечивают высокую надежность, большую вычислительную мощность и быстродействие, а также высокую точность измерения электрических величин и временных интервалов, что дает возможность повысить чувствительность защитных функций. Реализованные в устройстве алгоритмы функций защиты и автоматики, а также схемы подключения устройства разработаны в сотрудничестве с представителями энергосистем, что облегчает внедрение новой техники проектировщикам и эксплуатационному персоналу. Элементная база входных и выходных цепей обеспечивает совместимость SMTN-3 с любыми типами устройств автоматики разных производителей – электромеханическими, электронными, аналого-цифровыми, микропроцессорными.

#### Список литературы

- 1 Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – М. : Энергия, 2007. – 198 с.
- 2 Быков, Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование / Е. И. Быков. – М. : Транспорт, 1977. – 431 с.

УДК 004.416.6

## ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМЫ 1С: БУХГАЛТЕРИЯ ДЛЯ БЮДЖЕТНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ

*Т. С. ГРОМЫКО, Д. В. ВЕРБЕНЕЦ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

На территории СНГ самым распространенным продуктом для автоматизации хозяйственной деятельности в организациях является 1С: Предприятие. Беларусь не стала исключением: многие предприятия и организации, как частные, так и государственные, ведут учёт с помощью системы 1С или осуществляют плавный переход на данный программный продукт.

База данных 1С является огромным источником информации, в неё постоянно вносят дополнения, изменяют, просматривают. К этой базе данных, зачастую, имеет доступ огромное количество людей, например, бухгалтер, программист, руководитель организации или проверяющее лицо. Чем больше людей с различными служебными и должностными обязанностями имеют доступ к системе, тем больше существует возможных угроз для утечки, модификации или повреждения информации.

Концепция информационной безопасности основывается на трех основных факторах: целостность, конфиденциальность и доступность информации. Целостность – гарантия сохранности данными верных значений, которая обеспечивается запретом для неавторизованных пользователей каким-либо образом изменять, модифицировать, разрушать или создавать данные. Доступность – гарантия того, что авторизованные пользователи всегда получают доступ к данным. Конфиденциальность – гарантия того, что определенные данные будут доступны только тем пользователям, которым этот доступ разрешен (такие пользователи называются авторизованными).

В любой сфере, которая ведёт электронный учёт, особенно важны факторы информационной безопасности. Контроль над соблюдением каждого из этих условий следует осуществлять таким образом, чтобы не нарушить работы всей системы в целом. Для этого требуется надлежащим образом поддерживать доступность системы, при этом не нарушая конфиденциальность и целостность информации базы данных.

Процесс развития систем 1С: Предприятие продолжается на протяжении 20 лет. За это время платформа 1С претерпела множество изменений и несколько глобальных перерождений. Последней актуальной версией является 1С: Предприятие 8.

На примере Белорусского государственного университета транспорта (далее – БелГУТ): был осуществлен переход с программного продукта 1С: Бухгалтерия 7.7 на актуальную версию.

С выходом современных систем 1С требования к защите информации постоянно возрастают. Версия 7.7 давно утратила свою актуальность. Реализуемая концепция безопасности в данной версии не удовлетворяет современным требованиям развития информационных систем: низкая масштабируемость, высокая степень доступности данных и недостаточная защищенность системы. Из-за большого отличия в принципах и методах ее работы (построения и функционирования) от версии 8, более детально рассматривать её в данной статье будет нецелесообразно.

Что касается версии 8, то существует два основных способа реализации работы системы 1С [1]:

- файловый вариант;
- клиент-серверный вариант.



Рисунок 1 – Файловый вариант

Файловый вариант подразумевает под собой одновременное хранение базы данных и работу пользователя на одном персональном компьютере (рисунок 1). Конфигурация и база данных хранятся на одном локальном диске, который доступен любому пользователю операционной системы. Это ключевое отличие дает неограниченные возможности по обходу системы защиты 1С.

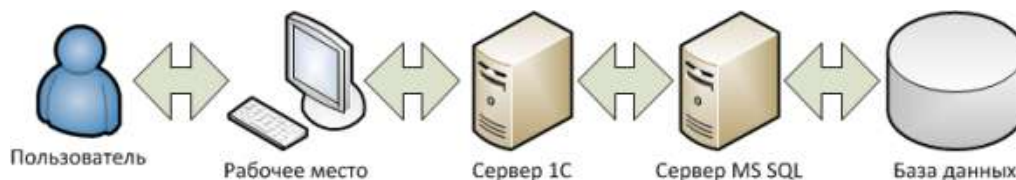


Рисунок 2 – Клиент-серверный вариант

От данного недостатка избавлены организации, которые избрали клиент-серверный вариант работы (данный вариант реализован в БелГУТе), который подразумевает под собой контакт пользователя с базой данных через сервер 1С, что, в свою очередь, значительно снижает возможности злоумышленника (рисунок 2). Данный вариант подразумевает под собой цепочку звеньев, каждое из которых участвует в процессе взаимодействия пользователя с базой данных [2]. На каждом из этих этапов существуют определенные уязвимости, связанные с пересылкой информации, хищением или повреждением данных. Приведём основные угрозы для системы 1С: Бухгалтерия:

- простые пароли пользователей системы;
- хранение паролей на листках бумаги, в памяти компьютера;
- использование старых логинов;
- вирусы;
- шпионские программы;
- перехват информации;
- открытый доступ пользователей к административным функциям;
- уязвимости операционной системы;
- уязвимости системы управления базами данных (далее – СУБД);

- отсутствие разграничений прав доступа в 1С;
- возможность доступа к данным сервера СУБД.

Многие уязвимости следует закрыть (или уменьшить риск их использования) еще на этапе внедрения и первоначальной настройки системы 1С. Базовая (коробочная) версия программы имеет минимальный набор ролей, пользователей и интерфейсов, которые могут использоваться лишь в качестве шаблонов для последующей настройки системы доступа.

Права и роли относятся к предметной области решений на основе 1С: Предприятие 8 – такой подход позволяет разрабатывать «коробочные» решения, не ориентируясь на внедрение в конкретную организацию или предприятие. Права определяют доступ к отдельным объектам конфигурации, роли определяют доступ к решению в целом, это позволяет управлять разграничением доступа на уровне администрирования системы. Стандартное (коробочное) решение является черновым, потому следует создать свои собственные роли, исходя из специфики работы организации. Тот же принцип касается интерфейсов и пользователей системы 1С: Бухгалтерия.

Защита от несанкционированного использования системы 1С: Предприятие может быть реализована с помощью следующих механизмов [3]:

- сетевого лицензионного ключа HASP4 Net;
- программного лицензирования.

Данные механизмы обеспечивают одновременную работу пользователей с системой 1С: Предприятие. При этом пользователи могут находиться как в рамках локальной сети, так и за ее пределами, например, при использовании веб-клиентов (доступ через браузер) или тонких клиентов, подключенных через веб-сервер.

Фирма 1С рекомендует следующие советы по настройке безопасности системы 1С:

- ограничить физический доступ к серверам;
- обеспечить бесперебойную работу серверов;
- установить и своевременно обновлять брандмауэры на серверах;
- присваивать пользователям сложные пароли;
- производить смену паролей через определенный промежуток времени;
- предоставлять пользователям достаточный набор прав, необходимый для их комфортной работы, исключая права, которые отвечают за административные действия;
- следить, чтобы на всех компьютерах с установленной системой 1С были установлены, включены и своевременно обновлялись антивирусные системы;
- ограничить и регламентировать доступ к сети Интернет;
- настроить системный аудит событий безопасности;
- допускать к работе с системой только квалифицированных пользователей;
- закрыть и опломбировать все системные блоки;
- не допускать к персональным компьютерам посторонних лиц;
- своевременно выгружать базу данных, создавать резервные копии;
- установить на рабочие места актуальную версию Windows.

В БелГУТе на этапе внедрения 1С: Бухгалтерия 8 были реализованы рекомендации, которые касаются ролевого разграничения доступа, администрирования системы, а также работы серверов 1С и SQL. Прочие меры можно внедрить в процессе поддержки данного программного продукта.

Перечисленный выше комплекс мероприятий не является исчерпывающим и гарантирующим полную защиту системы 1С: Предприятие. Тем не менее, эти действия важно реализовать на этапе внедрения системы, так как это значительно снизит риски с учетом существующих уязвимостей. Далее, на этапе поддержки и сопровождения системы, следует продолжить контроль за соблюдением перечисленных мер. Администратору системы также следует своевременно реализовывать актуальные обновления платформы и конфигурации 1С, а также отслеживать новые уязвимости системы.

#### Список литературы

- 1 Профессиональная разработка в системе 1С: Предприятие 8 / под ред. М. Г. Редченко. – М. : 1С-Паблишинг. – СПб. : Питер, 2006. – 808 с.
- 2 1С: Предприятие. Клиент-серверный вариант. Руководство администратора / А. Алексеев [и др.]. – 2-е изд. – М. : Фирма «1С», 2011. – 170 с.
- 3 1С: Предприятие. Руководство администратора / А. Алексеев [и др.]. – 2-е изд. – М. : Фирма «1С», 2011. – 297 с.



## ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

*А. Б. ДЕМУСЬКОВ*

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь*

На сегодня в нашу жизнь как на производстве, так и в быту проникают информационные технологии. И с появлением новых электронных устройств и программного обеспечения к ним появляются и информационные угрозы. Они могут проявляться как угрозы, порча и кража данных, блокирование баз данных и каналов связи вплоть до вывода из строя ресурсных серверов.

Для построения защиты от всевозможных информационных атак на любом предприятии должна быть построена система информационной безопасности. Под системой информационной безопасности можно понимать набор принятых управленческих решений, направленных на защиту как самой информации, так и ресурсов, с ней связанных. Как правило, систему безопасности строят на трёх уровнях. К первому уровню относят решения, затрагивающие предприятие в целом. Они могут носить весьма общий характер и, как правило, должны исходить от руководства предприятия. На этот уровень выносятся управление защитными ресурсами и координация использования этих ресурсов, определение специального персонала для защиты важных систем. На первом уровне система должна четко очерчивать сферу своего влияния. Должны быть определены должностные лица и их обязанности по выработке системы безопасности и по проведению ее в жизнь. В этом смысле система безопасности является основой подотчетности определённого персонала.

Ко второму уровню можно отнести вопросы отдельных аспектов информационной безопасности, но важных для различных систем, эксплуатируемых предприятием. Система должна отражать запрещённые действия и последствия за их нарушение.

Среди действий по реализации информационной безопасности в жизнь проводятся управленческие мероприятия. Чтобы понять и реализовать программу информационной безопасности, ее необходимо структурировать в соответствии со структурой предприятия. В простейшем случае достаточно двух уровней: верхнего, который охватывает всю организацию, и нижнего, который относится к отдельным сервисам или группам однородных сервисов.

Программу верхнего уровня возглавляет лицо, отвечающее за информационную безопасность предприятия. У этой программы должны быть определены главные цели:

- управление рисками (оценка рисков, выбор эффективных средств защиты, и т. д.);
- координация деятельности в области информационной безопасности;
- стратегическое планирование;
- контроль деятельности в области информационной безопасности.

В рамках программы верхнего уровня принимаются стратегические решения по безопасности, оцениваются технологические новинки. Информационные технологии развиваются очень быстро, и необходимо иметь четкие понятия отслеживания и внедрения новых средств.

Контроль деятельности в области информационной безопасности имеет двоякую направленность. Во-первых, необходимо гарантировать, что действия предприятия не противоречат законам. Во-вторых, нужно постоянно отслеживать состояние информационной безопасности внутри предприятия и реагировать на все нарушения.

Так же необходимо понимать, что программа верхнего уровня должна занимать надежное место в деятельности предприятия, она должна официально приниматься и поддерживаться руководством, у нее должны быть определенные штаты, бюджет и определённый уровень полномочий.

Целью программы нижнего уровня является обеспечение надежной и экономичной защитой конкретных сервисов. На этом уровне решается, какие механизмы защиты использовать, закупаются и устанавливаются технические средства, выполняется повседневное администрирование, отслеживается состояние слабых мест.

Из множества возникающих рисков при выполнении мероприятий по защите интерес составляются только те, которые являются следствием использования информационных технологий.

Работы по управлению рисками состоят в том, чтобы оценить их размер, выработать меры по уменьшению их размера и затем убедиться, что риски приемлемы или могут быть сделаны такими.

Риски нужно контролировать постоянно. И качественно выполненная и документированная первая оценка может существенно упростить последующую деятельность.

Для небольшого предприятия допустимо рассматривать всю информационную инфраструктуру. Однако, если предприятие крупное, всеобъемлющая оценка может потребовать неприемлемых затрат времени и сил. В таком случае следует сосредоточиться на наиболее важных сервисах, заранее соглашаясь с приближенностью итоговой оценки. Если важных сервисов все еще много, выбирают те из них, риски для которых заведомо велики или неизвестны.

Очень важно выбрать разумную методологию оценки рисков. Целью оценки является получение ответа на два вопроса: приемлемы ли существующие риски, и если нет, то какие защитные средства экономически выгодно использовать.

Выбирая подходящий способ защиты, необходимо учитывать возможность покрытия одним сервисом безопасности сразу нескольких других сервисов. Важным обстоятельством является совместимость нового средства со сложившейся операционной и аппаратно-программной структурой предприятия и его подразделений.

Реализацию и проверку новых сервисов безопасности следует предварительно спланировать. Необходимо составить план тестирования, в котором учесть и наличие финансовых средств, и сроки обучения персонала. Когда намеченные меры приняты, необходимо проверить их действия и убедиться, что остаточные риски приемлемы. Если это на самом деле так, значит, все в порядке и можно спокойно намечать дату ближайшей переоценки. В противном случае придется проанализировать допущенные ошибки и провести повторный сеанс управления рисками.

Все эти мероприятия и есть основная часть управленческих мер обеспечения информационной безопасности.

#### Список литературы

- 1 Демуськов, А. Б. Проблемы информационной безопасности в компьютерных сетях / А. Б. Демуськов, Г. И. Большакова, Т. П. Бышик // Известия Гомельского госуниверситета им. Ф. Скорины. – 2003. – № 3 (18).
- 2 Демуськов, А. Б. Политики информационной безопасности предприятий / А. Б. Демуськов, В. А. Короткевич, Л. И. Короткевич // Известия Гомельского госуниверситета им. Ф. Скорины. – 2003. – № 4 (19).
- 3 Герасименко, В. А. Основы защиты информации / В. А. Герасименко, А. А. Малюк. – М. : МИФИ, 1997.
- 4 Научная сессия МИФИ-2003. Проблемы информационной безопасности в системе высшей школы : X Всероссийская науч. конф. : сб. науч. тр. – М. : МИФИ, 2003. – 256 с.
- 5 Гостехкомиссия России. Руководящий документ. Концепция защиты СВТ и АС от НСД к информации. – М., 1992.
- 6 Гайкович, В. А. Безопасность электронных банковских систем / В. А. Гайкович, А. Першин. – М. : Единая Европа, 1994.

УДК 004.052.32+681.518.5

## МЕТОДЫ СИНТЕЗА САМОПРОВЕРЯЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ КОДОВ

*Д. В. ЕФАНОВ*

*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

*Р. Б. АБДУЛЛАЕВ*

*Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,  
Российская Федерация*

В современном мире все более прогрессивнее происходит переход от использования выполнения операций вручную к применению автоматизированных и автоматических систем управления в выполнении задач любых сложностей [1]. Такие системы для выполнения различных задач проектируются с разным уровнем надежности. Для систем с высоким уровнем надежности на этапе их проектирования используют различные методы обеспечения отказоустойчивости, к примеру, в системах микропроцессорного исполнения широко используют резервирование и диверсифицирование блоков и узлов системы для обнаружения в их структуре сбоев и отказов, для реализации отдельных схем используют высоконадежные логические составляющие и т. п. [2]. Дублирование узлов и компонентов подразумевает многократное увеличение аппаратных средств при построении системы. Для сокращения показателей структурной избыточности системы в целом при сохранении

свойств обнаружения внутренних неисправностей в контролируемых блоках и узлах широко используют методы синтеза самопроверяемых встраиваемых схем контроля [3]. С такой целью схемы встроенного контроля реализуются с применением помехоустойчивых кодов по структуре, изображенной на рисунке 1.

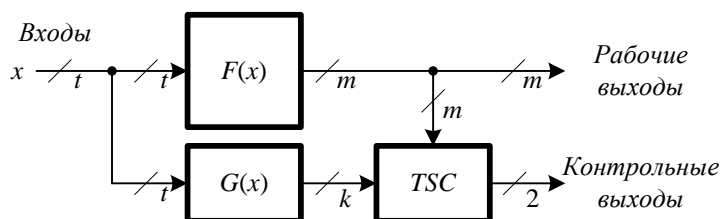


Рисунок 1 – Структурная схема организации контроля логического устройства на основе помехоустойчивого кода

На рисунке 1 блок  $F(x)$  является диагностируемым устройством с количеством выходов, равным  $m$ . Блок  $G(x)$  является контрольной схемой, вырабатывающей контрольные функции  $k$  от значений входных переменных  $x$ . Блок  $TSC$  представляет собой тестер, состоящий из кодера используемого помехоустойчивого кода и компаратора. На входы кодера подаются комбинации длиной  $m$  от рабочих функций блока  $F(x)$ , а на выходах формируются контрольные векторы длиной  $k$  заранее выбранного кода. Функции блока  $G(x)$  и кодера, как правило, реализуются взаимно инверсными, а компаратор реализуется на основе элементарных модулей сжатия парафазных сигналов [4]. Тестер снабжается двумя выходами, на которых формируется сигнал контроля: при отсутствии неисправностей и ошибок в вычислениях формируется парафазный сигнал, установка непарафазного сигнала свидетельствует о наличии ошибок.

Выигрыш такой системы на основе помехоустойчивого кода по аппаратурным затратам по сравнению с дублированием достигается благодаря использованию в схемах сравнения меньшего по длине контрольного вектора. Однако уменьшение числа контрольных разрядов влияет на характеристики обнаружения ошибок на выходах логических устройств. В практических реализациях, однако, часть ошибок определенных видов и кратностей формируется не всегда, что определяет и возможности применения избыточного кодирования для контроля логических устройств. Рассмотрим методы синтеза самопроверяемых устройств на основе широко известных полиномиальных кодов [5].

**1 Метод синтеза схемы контроля на основе подбора образующего полинома.** Образующие полиномы определяют значение  $k$  и характеристики обнаружения ошибок кодом. Для построения схемы контроля с обнаружением полного множества ошибок на выходах контролируемых объектов анализируются виды и кратности проявляющихся на их выходах ошибок при внесении неисправностей из заданного класса. Затем определяются полиномы, позволяющие идентифицировать полученные виды ошибок.

Эксперименты с большим числом контрольных схем показывают, что представленный метод позволяет в ряде случаев синтезировать полностью самопроверяемые устройства. Если для устройства не удастся построить схему контроля за счет подбора образующего полинома, то применяют следующие методы.

**2 Метод синтеза схемы контроля на основе полиномиальных кодов, обнаруживающих определенные кратности ошибок.** В зависимости от структуры исходного устройства кратности ошибок на его выходах могут быть различными. Полиномиальными кодами не обнаруживаются полностью все кратности ошибок, но при этом обнаруживаются полностью определенные кратности ошибок, в основном, ошибки малых кратностей. Это свойство можно учесть при синтезе схемы контроля. В таком случае для обнаружения полного множества ошибок на выходах устройства предлагается разбиение его выходов на группы контролепригодных выходов по полиномиальным кодам. Для этого подбирается полиномиальный код, обнаруживающий все ошибки до определенной кратности  $d$ . На множестве выходов схемы осуществляется поиск подмножеств таких выходов, на которых при внутренней неисправности в объекте диагностирования возможно одновременное проявление ошибок. Определяется число  $r$  таких выходов в каждом подмножестве. Очевидно, что при  $r > d$  для искомым подмножеств не гарантируется обнаружение полного множества ошибок на выходах устройства. В таком случае, если число  $r > d$  для некоторого подмножества, то из данного подмножества «исключают» несколько выходов и включают их в другое подмножество или формируют новое подмножество выходов с таким расчетом, чтобы в каждом подмножестве выходов вы-

полнялось условие  $r \leq d$ . Подмножества выходов можно объединять в одну группу, если на данных подмножествах выходов одновременное проявление ошибок при внутренних неисправностях исключено. Для каждой контролируемой группы реализуется своя схема контроля, а затем выходы различных схем контроля объединяются на входах самопроверяемого компаратора.

**3 Метод синтеза схемы контроля на основе полиномиальных кодов, обнаруживающих определенные виды ошибок.** Согласно классификации ошибок в кодовых векторах могут возникать следующие виды ошибок: одиночные, монотонные, симметричные и асимметричные ошибки [4]. Одиночные ошибки связаны с искажениями только одного разряда, монотонные, симметричные и асимметричные – двух и более. Если искажаются только нулевые или только единичные разряды, то ошибка считается монотонной, иначе – симметричной или асимметричной. Симметричная ошибка имеет четную кратность и связана с одинаковым числом искажаемых нулевых и единичных значений. Асимметричная ошибка – это ошибка, связанная с неравным количеством искажений нулевых и единичных разрядов. В ходе исследования полиномиальных кодов установлено, что некоторые образующие полиномы позволяют строить коды с полным обнаружением ошибок определенных видов [5]. В таком случае, для построения схемы контроля с идентификацией полного множества ошибок анализируются все возможные виды ошибок на выходах устройства. Далее формируются группы контролепригодных по полиномиальным кодам выходов устройства. Для этого из множества выходов выделяются такие, на которых проявляются только симметричные или только асимметричные ошибки. Выходы с одноименным видом ошибок помещаются в одну группу. Для каждой сформированной группы реализуется своя контрольная схема.

В конечном счете, при проектировании систем на основе рассмотренных методов выбирается метод, позволяющий синтезировать самопроверяемое устройство с минимальной структурной избыточностью.

Приведенные выше методы синтеза схем встроенного контроля на основе полиномиальных кодов позволяют получать устройства, имеющие свойство обнаружения полного множества ошибок с наименьшими аппаратными затратами.

#### Список литературы

- 1 Control Systems: Theory and Applications / V. Kuntsevich [et al.] // River Publishers Series in Automation, Control and Robotics, 2018.
- 2 Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников [и др.] ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М. : Транспорт, 1995. – 272 с.
- 3 Надежность и эффективность в технике: Справочник в десяти томах. Т. 9: Техническая диагностика / под ред. В. В. Клюева и П. П. Пархоменко. – М. : Машиностроение, 1987. – 352 с.
- 4 Сапожников, В. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования : [монография] / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – Т. 1: Классические коды Бергера и их модификации. – М. : Наука, 2020. – 383 с.
- 5 Abdullaev, R. Polynomial Code with Detecting the Symmetric and Asymmetric Errors in the Data Vectors / R. Abdullaev [et al.]. // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'2019), Batumi, Georgia, September 13–16. – 2019. – P. 157–161. – DOI: 10.1109/EWDTs.2019.8884451.

УДК 658.56

## ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ФМЕСА МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

*И. О. ЖИГАЛИН, С. И. ХОМЕНКО, И. В. ЛОГВИНЕНКО*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

ФМЕСА (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) – это инструмент для анализа потенциальных отказов, их последствий и критичности. Метод применяется при оценке соответствия требованиям по функциональной безопасности и предназначен для выявления потенциальных отказов, причин их возникновения и последствий при эксплуатации [1]. Эффективность ФМЕСА заключается в том, что, благодаря усилиям на начальной стадии, можно добиться соответствия заданным ТНПА требованиям по функциональной безопасности на последующих этапах жизненного цикла продукта. Кроме того, исключение потенциальных отказов позволяет существенно снизить количество доработок до соответствия требованиям по функциональной безопасности.

FMESA – обязательный этап подтверждения соответствия процессорных систем требованиям безопасности микроэлектронных блоков и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики и рассматривается как методика по снижению рисков, что актуально при производстве продукции, к которой предъявляются особые требования по безопасности (SIL4) [2]. Результаты FMESA включают в доказательство безопасности микроэлектронных блоков, устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ).

Этапы проведения FMESA-анализа:

- определяется объект исследования и собирается команда экспертов. Для сложной, составной структуры четко очерчиваются границы, в рамках которых проводится анализ.
- составляется список тех элементов объекта, которые могут привести к возникновению отказов.
- для выбранных на предыдущей стадии объектов анализируются потенциальные отказы, их критичность.

При анализе FMESA требуется хорошая конструкторская документация для полного понимания принципов функционирования системы в целом и ее отдельных узлов, так как при недостаточном качестве документации возможны разночтения в понимании принципов работы отдельных узлов, что в дальнейшем потребует дополнительных консультаций с разработчиками аппаратного и программного обеспечения (ПО) и усложняет процесс проведения анализа. По результатам FMESA возможна корректировка аппаратных средств.

Сложности анализа микроэлектронных СЖАТ заключаются в трассировке требований до отдельных функциональных блоков и необходимости анализа последствий отказов во всех режимах работы системы.

Для большинства блоков и устройств СЖАТ необходимо проведение моделирования процессов. При этом предпочтительно проводить проверку на стенде, имитирующем реальный узел, с имитацией отказов. Введение отказов при анализе может привести к выходу узла из строя или изменению параметров, входящих в него элементов. На данный момент существует возможность программного схемотехнического моделирования узлов электронных устройств. Но здесь возникает риск некорректного результата моделирования из-за особенностей ПО или неверных установок параметров моделирования. В сложных схемах выделяются и моделируются отдельные ответственные узлы, которые на взгляд эксперта могут приводить к опасным отказам. При этом возникают сложности с выбором параметров входных воздействий на узел, учитывающих все возможные состояния. Также при моделировании узлов сложно учесть всю возможную совокупность изменений параметров группы элементов (в допустимых пределах).

В схемах с высокой плотностью монтажа сложно анализировать короткое замыкание (КЗ) между выводами, т.к. они расположены на небольшом расстоянии и отсутствуют технические решения, позволяющие исключить КЗ (покрытие непроводящим лаком). Например, при расстоянии между выводами в 1 мм, в радиус 3 мм попадает до 28 выводов, с которыми требуется проанализировать последствия КЗ. В таких случаях можно анализировать не все близкорасположенные выводы, а выявлять сочетания выводов, КЗ между которыми могут приводить к опасным отказам. Например, КЗ выводов интерфейсов различных типов с динамическими сигналами будет выявлено соответствующими контроллерами и не приведет к опасным последствиям (защитный отказ).

При моделировании требуется применять программные модели интегральных схем (ИС), которые зачастую отсутствуют в базе ПО системы моделирования. Программные модели ИС можно получить от производителя, но в некоторых случаях разработчик модели не учитывает ряд критичных параметров, используя упрощенную функциональную модель. Введение отказа не позволяет с полной уверенностью утверждать правильность результата моделирования. При этом не все модели позволяют имитировать требуемые отказы. Кроме того, для процессорных структур существуют специфические отказы, которые в моделях не предусмотрены, что не позволяет в полной мере применять моделирование. Анализируя процессорные системы, требуется учитывать не только аппаратное обеспечение, но и ПО. Зачастую тип отказа зависит от того, как ПО среагирует на отказ.

При анализе существует возможность исключить из рассмотрения ряд узлов, отказ которых гарантированно приводит к защитному состоянию (защищенные шины данных; блоки питания, при наличии средств контроля и т. д.). Требуется экспертная оценка возможности такого исключения, т. к. неправильное исключение из анализа потенциально опасно.

В большинстве случаев производитель ИС при составлении документации, не описывает поведение изделия при некоторых воздействиях. Например, при наличии нескольких выводов питания (земли), не указывается поведение устройства при изменении схемы подключения (обрыв, короткое замыкание

одного вывода). Также часто не указываются параметры настройки портов по умолчанию (подтягивание), что усложняет анализ при обрывах. Зачастую отсутствует информация о нагрузочной способности порта, что усложняет анализ его поведения при отказах.

Сложные ИС обычно рассматриваются на уровне функциональных блоков. Рассмотрение поэлементно затруднено, а в большинстве случаев невозможно. Однако для определения последствий отказов необходим анализ внутренней структуры блока, которая зачастую недостаточно детализирована.

Применение FMESA анализа позволяет на этапе проектирования скорректировать технические требования к ПО устройства, а при экспертизе установить правильность и целостность его функционирования. На основании маскируемых отказов можно выявить цепочку накапливаемых отказов, приводящую к опасному состоянию. Анализ цепочки позволяет рассчитать вероятность наступления опасного отказа. Большинство выявленных проблем решаются на этапе проектирования аппаратных средств и ПО при тесном взаимодействии с разработчиком микроэлектронной системы.

Таким образом, рассмотренные в докладе особенности FMESA анализа микроэлектронных СЖАТ повышают роль экспертной оценки. Поэтому при высоких требованиях по функциональной безопасности (SIL4) получение достоверной оценки требует высокой квалификации эксперта, который при неопределенности исходных данных должен оценить верхнюю границу показателей безопасности (интенсивность опасных отказов) и подтвердить соответствие этих показателей требованиям нормативных документов.

#### Список литературы

1 **Николаева, Н. Г.** FMESA – анализ видов и последствий отказов : учеб. пособие / Н. Г. Николаева, С. М. Горюнова. – Казань : КГТУ, 2007. – 93 с.

2 **Скляр, В. В.** Обеспечение безопасности АСУТП в соответствии с современными стандартами : метод. пособие / В. В. Скляр. – М. : Инфра-Инженерия, 2018.

УДК 656.256:519.683.7

## **ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОГРАММИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ**

*А. Ю. КАМЕНЕВ, А. А. ЛАПКО, Е. В. ЩЕБЛЫКИНА*

*Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков*

*Н. В. КАМЕНЕВА*

*Харьковское отделение филиала «Проектно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» АО «Украинская железная дорога»*

Расширение объёмов и сфер внедрения микропроцессорных систем железнодорожной автоматики (ЖА) на магистральном и промышленном транспорте предопределяет развитие методов и средств автоматизированного проектирования и программирования заложенных в них программно-аппаратных устройств. Классические системы автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизации инженерных расчётов (САЕ) в своих стандартных библиотеках, как правило, не содержат необходимых символов, функций и методов, с помощью которых возможно проектирование и программирование (в том числе конфигурирование) систем управления различных производителей. В соответствии с этим необходима разработка отдельных методов и моделей выполнения этих задач, которые могут быть интегрированы с существующими САПР- и САЕ-системами.

В рамках последних исследований, проведённых в частности специалистами Украинского государственного университета железнодорожного транспорта в коллаборации со внешними стейкхолдерами, были разработаны методы, модели и средства автоматизированного проектирования и программирования систем ЖА, базируемые на графоаналитическом (в том числе графо-функциональном) представлении технологических объектов ЖА.

При этом реализация новых методов и технологий проектирования и программирования требует надлежащей верификации достоверности и адекватности заложенных в них моделей с позиции обеспечения надлежащей надёжности и безопасности функционирования устройств ЖА, являющихся продуктом указанных этапов разработки. В выполненных научно-прикладных исследованиях доказано, что для вложенных графо-функциональных моделей, закладываемых в САПР- и САЕ-

системы, ключевым критерием достоверности и адекватности является изоморфизм исходных и контрольных функциональных графов технологических объектов ЖА. При этом исходный граф является базовой геометрической моделью технологического объекта, а контрольный граф - визуализацией либо иной интерпретацией результатов работы САПР (САЕ). Таким образом, задача верификации сводится к формированию человеко-машинного интерфейса работы САПР- или САЕ-системы с визуализацией контрольного графа при последующем его анализе на предмет изоморфизма с исходным функциональным графом.

На примере системы микропроцессорной централизации (МПЦ) станции «Карapyши» регионального филиала «Юго-Западная железная дорога» АО «Украинская железная дорога» указанная задача решается на этапах производства и сертификации системы с участием ООО «Хартрон-Энерго», ООО «НПП «САТЭП», Харьковского отделения филиала «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта» АО «Украинская железная дорога» и Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Для автоматизированного программирования и испытаний системы МПЦ сформирована исходная графо-функциональная модель, в которой вершины определяют объекты управления и контроля (ОКК), а их вложенные функционалы – соответствующие статические свойства и динамические характеристики (рисунок 1). Рёбра при этом определяют исключительно связи между ОКК, в отличие от графо-параметрических моделей, которые применялись до недавнего времени с аналогичными целями.

Аналитическая интерпретация указанной геометрической модели с использованием функционально-топологических матриц смежности и метода прямых сумм, закладываемых в соответствующую САПР- или САЕ-систему, позволяет синтезировать необходимые программные средства и техническую документацию ЖА.

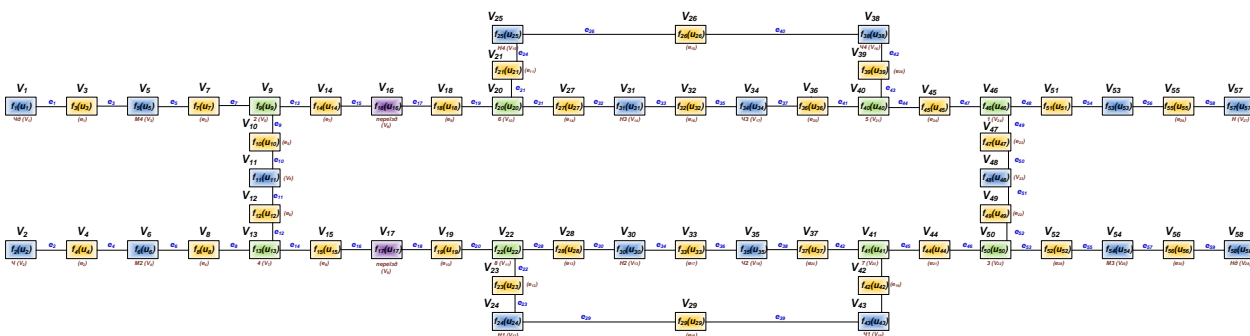
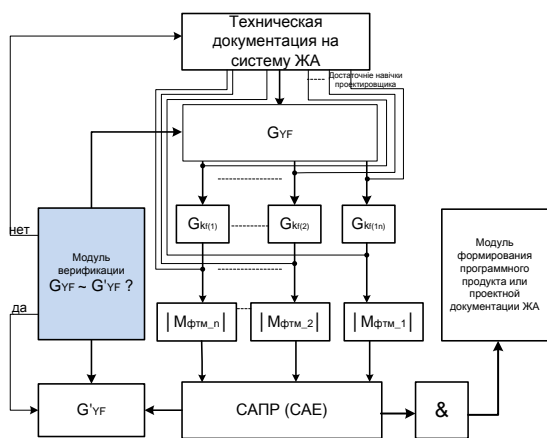


Рисунок 1 – Базовая графо-функциональная модель системы МПЦ станции «Карapyши»

Для верификации моделей (результатов автоматизированного проектирования и программирования) разработан отдельный модуль, который интегрируется с известными САПР- и САЕ-системами и позволяет визуализировать результат синтеза программно-технических средств. На примере МПЦ станции «Карapyши» результат работы указанного модуля приведен на рисунке 2.

а)



б)

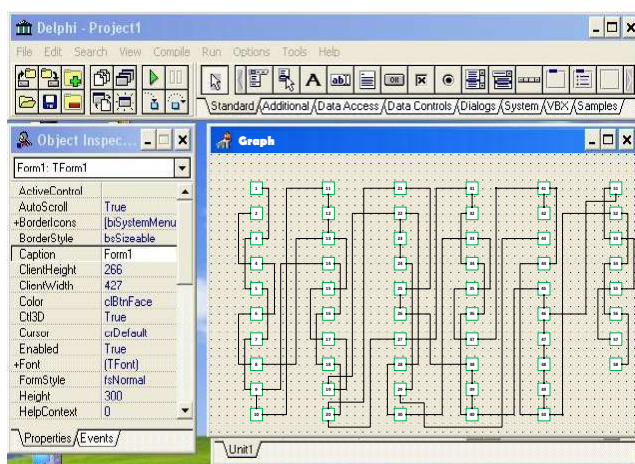


Рисунок 2 – Структура интеграции (а) и визуализация работы (б) модуля верификации САПР системы МПЦ станции «Карapyши»

Автоматизированное проектирование и программирование выполняется на основании составления компонент  $G_{kf}$  функционального графа  $G_{УФ}$ , который сравнивается с контрольным графом  $G'_{УФ}$ . Для каждой компоненты составляется исходный блок  $|M_{фгм}|$  функционально-топологической матрицы смежности (рисунок 2, а).

В центральной части рисунка 2, б приводится контрольный граф как результат визуализации результатов автоматизированного проектирования и программирования.

Из анализа графов, приведенных на рисунках 1 и 2, следует их изоморфизм, что является свидетельством корректного процесса выполненных проектных работ. В соответствии с этим сформированный программный продукт можно считать условно безопасным, который следует допускать к соответствующим испытаниям и прочим процедурам доказательства безопасности МПЦ.

Кроме этого, как показали исследования, применение графо-функциональных методов исходной интерпретации технологических объектов является более эффективным, по сравнению с графо-параметрическими методами с позиции ресурсоемкости и влияния на показатели эксплуатационной надежности систем ЖА. В частности, реализация новых методов позволяет сократить временные ресурсы на автоматизированное проектирование и программирование до четырех раз, увеличить глубину контроля устройств ЖА до двух раз, повысить эксплуатационную готовность систем ЖА до 18 % и сократить непродуктивный простой поездов до 16 %.

Таким образом, подтверждается целесообразность исследования и продолжения реализации его направлений.

УДК 625.8

## ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ СТЕГАНОГРАФИИ

*В. М. КОВАЛЕНКО, С. Н. БЕЛАН*

*Государственный университет инфраструктуры и технологий, г. Киев, Украина*

**Введение.** В настоящее время развитие стеганографии вызвано распространением персональных компьютеров мультимедийных приложений и развитием информационных систем, а также сетей общего пользования. Современную стеганографию правильно было бы называть компьютерной или цифровой стеганографией, так как скрытые сообщения обычно встраиваются в данные, представленные в некотором цифровом (электронном) формате [1–3].

**Постановка проблемы.** Основной проблемой обеспечения безопасности информационных компьютерных систем является задача ограничения круга лиц, имеющих доступ к конкретной информации, и защиты ее от несанкционированного доступа. В связи с быстрым развитием мультимедийных технологий возникает все большая потребность в защите прав и интеллектуальной собственности, представленной в цифровом виде, так как возможна кража и модификация сообщения при передаче или представлении информации. Поэтому одним из наиболее эффективных видов защиты мультимедийной информации является цифровой стеганографический способ защиты сообщения, который можно использовать в железнодорожных мультимедийных сетях связи для защиты сообщений.

**Цель работы.** Повышение объема передающейся информации в мультимедийных сетях связи на железной дороге с помощью стеганографии на основе графических контейнеров.

**Суть работы.** Методы сокрытия информации в графических файлах базируются на модификации цифрового представления графических изображений, выступающих в роли контейнеров. В стеганографических системах в качестве контейнеров выступают оцифрованные изображения, так как они обладают свойствами, которые могут позволить произвести незаметное внедрение данных.

Суть метода замены наименее значащего бита Least Significant Bits (LSB) заключается в сокрытии информации путем изменения последних битов изображения [4]. Цифровые изображения являются собой матрицу пикселей. Цвет и яркость каждого пикселя представляется двоичным кодом. Младший значащий бит кода каждого пикселя изображения несет в себе меньше всего информации. Человек, обычно, не способен заметить изменение в этом бите, для него он является шумом и



его можно использовать для встраивания информации. В изображение формата BMP хранится матрица значений оттенков для каждой точки хранимого изображения. Если каждый из компонентов пространства RGB (каналов цвета) хранится в одном байте, матрица может принимать значения от 0 до 255 включительно, что соответствует 24-битной глубине цвета. Особенностью зрения человека является то, что оно слабо различает незначительные колебания цвета. Для 24-битного цвета изменение в каждом из трех каналов одного наименее значимого бита (крайнего правого) приводит к изменению менее чем на 1 % интенсивности данной точки, что позволяет изменять их незаметно для зрения по своему усмотрению.

Принцип работы стеганографического метода защиты сообщений заключается в следующем. Пусть, имеется 24-битное изображение в градациях серого. Пиксели кодируются тремя байтами, и в них расположены значения каналов RGB. Изменяя наименее значимый бит, мы меняем значение байта на единицу. Такие градации, мало того, что незаметны для человека, они могут вообще не отобразиться при использовании низкокачественных устройств вывода. Применение стеганографического метода LSB в среднем требует, чтобы только половина бит изображения-контейнера были изменены.

Существует небольшая модификация представленной методики стеганографии, позволяющая использовать для встраивания сообщения в два или более младших бит на байт. Это увеличивает объем скрытой информации в объекте-контейнере, но скрытность сильно снижается, что облегчает обнаружение результатов осаднения информации.

Суть модификации. Определённый текст в соответствии с кодировкой ASCII преобразуется в числовой вид, символы заменяются на соответствующие числовые коды. На следующем шаге с помощью секретного ключа определяется место осаднения информации. Замена значений трех составляющих цвета (красный, зелёный, синий) будет осуществляться не в двоичном, как в классическом LSB методе, а в десятичном виде. Замена подлежат наименее значимые (правые) цифры значений соответствующего цветового канала. При использовании символов кириллицы (ASCII коды >127) потребуется задействовать и зеленую составляющую пикселя, или же как альтернатива увеличить количество задействованных в процессе осаднения пикселей. При замене в красную составляющую будет записываться первая цифра двоичного кода символа, а в синюю составляющую вторая цифра двоичного кода символа. Такой механизм будет изменять не один младший бит, как это было бы в классическом методе LSB, а целую группу бит, причем необязательно начиная с младшего разряда. Но при этом все равно будет достигаться незначительное изменение цвета пикселя, в то же время, при применении данного варианта будет улучшаться такая характеристика, как максимально возможное количество информации в графическом контейнере изображения.

Изображения, при использовании данного программного средства, можно сохранять в любом графическом формате, но при этом не предусматривается использование графического формата jpg со сжатием. В формате jpg приходят операции, что в свою очередь приводят к замене группы значений на усредненное, тем самым повреждая информацию, что была кодирована до этого.

В работе решается задача внедрения скрытой информации в шумы изображения. Цифровой шум является дефектом изображения, который вносят фотосенсоры и электроника устройств, которые их используют, из-за несовершенства технологий и фотонной природы света. Цифровой шум появляется на изображении в виде наложенной маски из пикселей случайных цветов и яркости. На большинстве цифровых камер шум имеет визуально более крупные зерна, чем пиксели на изображении. Это побочный эффект для алгоритма получения полноцветного изображения. Цифровой шум менее заметен в трех матричных системах или матрицах без фильтра. В цветном изображении шум может иметь разную интенсивность в зависимости от каналов изображения, что визуально его окрашивает. Некоторые изображения (фотографии) имеют большое количество шумов, которые можно использовать с пользой в данной модификации.

В работе внедрялись биты секретного сообщения до четырех младших бит, что не приводит к искажениям визуальной картины. Кроме младших разрядов кодов всех пикселей дополнительно встраиваются еще до четырех бит в коды пикселей шума, что увеличивает объем передаваемого сообщения в контейнере фиксированной длины. Этот дополнительный объем зависит от количества пикселей, принадлежащих шуму изображения.

**Заключение.** Из ключевых принципов при построении стеганографических систем можно выделить визуальную неразличимость заполненного и незаполненного контейнеров, а также аутентичность и целостность секретной информации. Изменение количества заменяемых бит позволяет варьировать пропускную способность стеганографической системы и существует необходимость исследования возможности использования старших бит для встраивания информации. Подробно описан метод стеганографического сокрытия данных, проанализированы некоторые его свойства (например, максимальная емкость контейнера). В качестве достоинств данного метода можно выделить, что размер файла-контейнера становится неизменным, при замене одного бита в канале синего цвета внедрение невозможно заметить визуально.

#### Список литературы

- 1 **Bennett, K.** Linguistic steganography: Survey, analysis, and robustness concerns for hiding information in text / K. Bennett. – Purdue Univ., CERIAS Tech. Rep. – 2004.
- 2 **Конахович, Г. Ф.** Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г. Ф. Конахович, А. Ю. Пузыренко. – Киев : МК-Пресс, 2006. – 288 с.
- 3 **Urbanovich, N.** The use of steganographic techniques for protection of intellectual property rights / N. Urbanovich, V. Plaskovitsky // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation. – 2011. – P. 147–148.
- 4 **Albdour, N.** Selection Image Points Method for Steganography Protection of Information / N. Albdour // WSEAS Transactions on signal processing. – 2018. – Vol. 14. – P. 151–159.

УДК 656.25 (078.5)

## БЕЗОПАСНОСТЬ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

*Д. В. КОМНАТНЫЙ*

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

На современном этапе развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) происходит не просто широкое внедрение микропроцессорных и микроэлектронных систем, но переход к новым концепциям разработки и эксплуатации систем управления движением поездов – цифровизации и интеллектуализации. Это объясняется необходимостью на новом уровне решить две основные задачи функционирования железнодорожного транспорта: обеспечение требуемой провозной способности и высокого уровня безопасности движения поездов. Наиболее эффективным путем решения этих задач является создание комплексной системы управления и обеспечения безопасности движения поездов. В современных условиях повышение безопасности движения требует не только развития традиционных систем ЖАТ, но и привлечения дополнительных ресурсов на базе информационных технологий и цифровых систем. Таким образом, на базе систем СЦБ организуется система обеспечения безопасности движения, а на базе АСУ – система управления процессами перевозок. Взаимодействуя между собой, эти системы образуют комплексную систему управления, кроме того, независимо они выходят на региональный уровень управления. Следовательно, система управления процессами перевозок в настоящее время является единым комплексом, основанным на единой вычислительной среде и единой цифровой сети. В ней образуют три контура безопасности. Первый – централизованный, он заключается в централизации управления маршрутами и координатного управления в диспетчерском центре управления. Второй – децентрализованный, его образуют системы СЦБ и технической диагностики. Третий – бортовой, в составе которого имеются системы АЛС и автоведения.

Вместе с тем возрастает чувствительность элементной базы вычислительных комплексов к электромагнитным помехам и воздействиям. Это объясняется увеличением степени интеграции полупроводниковых изделий, снижением энергии рабочих сигналов этих изделий, увеличением плотности монтажа, усложнением схемотехнических решений.

Число возможных видов электромагнитных воздействий также увеличилось. В том числе появилась техническая возможность создания сверхширокополосных импульсов электромагнитного поля для преднамеренного воздействия этими импульсами на микроэлектронные технические средства (ТС) с целью создания большого потока сбоев в этих средствах или вывода их из строя. Объектами воздействия электромагнитными импульсами преднамеренного воздействия (ЭИПВ) может оказаться и аппаратура современных систем управления процессами перевозок железнодорожных

магистралей, особенно на крупных железнодорожных узлах и линиях скоростного движения, что повлечет за собой недопустимое снижение уровня безопасности движения.

Следует учитывать, что оборудование всех трех уровней системы управления перевозками и обеспечения безопасности оказывается подверженной действию электромагнитных помех. При этом аппаратура систем СЦБ имеет в своем составе большое количество напольных устройств. Эти устройства размещены на территории путевого парка станции (в случае электрической централизации), либо на перегонах (в случае автоблокировки, диспетчерской централизации, диспетчерского контроля). Поэтому практически невозможно добиться достаточного удаления мест, где возможно скрытое расположение генератора ЭИПВ, от мест эксплуатации аппаратуры СЖАТ. Также на оборудование системы управления перевозками воздействуют электромагнитные помехи, созданные молниями, аварийными режимами контактной сети и близлежащих линий электропередачи, радиотехническими и промышленными установками. На аппаратуру микроэлектронных СЖАТ и компьютеры АСУ воздействуют внутриаппаратурные помехи, помехи по цепям питания, электростатические разряды, наносекундные импульсы при коммутации реле. Таким образом, помеховая обстановка имеет тенденцию ко все большему усложнению для всех ступеней организации системы управления движением поездов. На каждой ступени возрастает число уязвимых ТС и каналов проникновения помех.

С точки зрения функциональной безопасности и надежности микроэлектронного оборудования систем управления перевозками воздействие электромагнитных помех на такое оборудование сопоставимо с воздействием отказов и сбоев элементной базы, вызванных технологическими и иными причинами. Следовательно, можно считать, что под воздействием электромагнитных помех значительно увеличивается интенсивность отказов и сбоев элементной базы.

В докладе вначале рассматривается влияние увеличения интенсивности отказов на нерезервированную систему, которая может быть моделью компьютеров диспетчерского центра управления. Коэффициент готовности такой системы выражается формулой

$$K = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент готовности;  $\mu$  – коэффициент восстановления,  $1/\text{ч}$ ;  $\lambda$  – интенсивность отказов,  $1/\text{ч}$ ;

Анализ формулы (1) показывает, что с ростом интенсивности отказов и при неизменном коэффициенте восстановления коэффициент готовности системы снижается. Чем выше интенсивность отказов, тем ниже коэффициент готовности.

Далее рассматривается влияние интенсивности отказов на систему управления с непрерывным контролем. Такая система отражает существенные свойства микроэлектронных систем СЦБ, которые в настоящее время выполняются многоканальными и снабжаются узлами автоконтроля, сравнения работы каналов, аварийного отключения и тому подобными средствами. Эти средства также изготавливаются из микроэлектронных изделий. Поэтому даже специальная схемотехника, а именно временная и пространственная парафазность сигналов, внутренний и внешний автоконтроль, не исключают возможности отказа или сбоя под воздействием электромагнитных помех. Коэффициент готовности системы с контролем выражается формулой

$$K = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2}}, \quad (2)$$

где  $\lambda_1$  – интенсивность отказов основного вычислительного канала,  $1/\text{ч}$ ;  $\mu_1$  – коэффициент восстановления основного вычислительного канала,  $1/\text{ч}$ ;  $\lambda_2$  – интенсивность отказов схемы контроля,  $1/\text{ч}$ ;  $\mu_2$  – коэффициент восстановления схемы контроля,  $1/\text{ч}$ .

Из формулы (2) также следует, что при росте интенсивности отказов и постоянстве коэффициентов восстановления коэффициент готовности системы снижается.

Таким образом, по результатам оценки воздействия электромагнитных помех на интенсивность отказов и показатель эксплуатации моделей микроэлектронных систем управления можно сделать вывод, что воздействие электромагнитных помех существенно снижает коэффициент готовности системы. Для систем, обеспечивающих безопасность движения поездов, такое снижение приводит к тому, что система перестает выполнять свои функции в достаточной степени. Особенно опасным становится такое снижение в условиях повышения интенсивности и скоростей движения поездов.

Поэтому для исключения роста интенсивности отказов под воздействием электромагнитных помех требуется снижение уровня помех в корпусах и узлах микроэлектронных ТС систем управ-

ления движением поездов. Для достижения этого необходимы методы предиктивного проектирования аппаратуры систем управления движением поездов, направленные на обеспечение требуемого уровня помехоустойчивости этой аппаратуры уже на этапе проектирования. Поскольку возникающие при этом электродинамические задачи отличаются высокой сложностью и решаются с упрощающими предположениями, то необходимым этапом внедрения новых систем СЦБ и АСУ является их сертификация и доказательство безопасности с проведением натуральных испытаний на воздействие электромагнитных помех. Так как имеется большое число помех, а испытательное оборудование является, в достаточном числе случаев, уникальным, то требуется комплексирование испытаний к разным видам помех. Также испытательные процедуры должны быть адаптированы к особенностям железнодорожных систем, а именно к высоким требованиям по полноте безопасности SIL 4.

Накопленный опыт работ в области электромагнитной совместимости систем управления движением поездов позволяет заключить, что все указанные задачи могут быть решены на должном уровне, достаточном для обеспечения безопасности движения.

УДК 656.259.12

## УЧЕТ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПРИ АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССОВ В РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ

*Д. В. КОМНАТНЫЙ*

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В докладе исследуется влияние ферромагнитных свойств рельсовой стали на процессы передачи синусоидального сигнала в рельсовой цепи. Для этого записывается система уравнений для цепи с распределенными параметрами и нелинейной погонной индуктивностью. При записи предполагается, что погонное сопротивление рельсовой цепи постоянное, погонная проводимость утечки также постоянная, погонная емкость рельсовой линии не учитывается. Вебер-амперная характеристика стали аппроксимируется полиномом третьей степени.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} - Ri, \quad \frac{\partial i}{\partial x} = -Gu, \quad u = Ri, \quad i = Gu, \quad \Phi(i) = ai + bi^3, \quad (1)$$

где  $u$  – напряжение в цепи, В;  $i$  – ток в цепи, А;  $\Phi$  – магнитный поток в цепи, Вб;  $x$  – координата, км;  $t$  – время, с;  $R$  – погонное сопротивление, Ом/км;  $G$  – проводимость утечки, См/км;  $a, b$  – коэффициенты аппроксимации вебер-амперной характеристики стали.

Система (1) преобразуется к нелинейному уравнению в частных производных для тока в рельсовой цепи

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} - RGi = (Ga + 3bGi^2) \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (2)$$

В уравнении (2) осуществляется замена переменных  $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow v \frac{d}{d\eta}$ ,  $\frac{\partial}{\partial x} \rightarrow \frac{d}{d\eta}$ . При этом  $v$  – скорость распространения сигнала в рельсовой цепи. Она определяется по известным формулам теории цепей с распределенными параметрами, в предположении, что индуктивность рельсовой цепи постоянная и не зависит от тока в цепи.

После замены уравнение (2) приводится к виду, удобному для применения метода Ван-дер-Поля

$$\frac{1}{G} \frac{\partial^2 i}{\partial \eta^2} - Ri = (a + 3bi^3) v \frac{\partial i}{\partial \eta}. \quad (3)$$

Для решения по методу Ван-дер-Поля вводится новое время  $\tau = \sqrt{RG}\eta$ .

Тогда уравнение (3) преобразуется к виду

$$\frac{d^2 i}{d\tau^2} - i = (a + 3bi^3) v \sqrt{\frac{G}{R}} \frac{di}{d\tau}. \quad (4)$$

Предполагается, что в первом приближении в рельсовой цепи распространяются синусоидальные волны. Поэтому решение уравнения (4) ищем в виде

$$i(\tau) = I_m \cos \Theta. \quad (5)$$

Первое приближение метода Ван-дер-Поля имеет вид

$$\dot{\Theta} = 1 - \frac{v\sqrt{G}}{I_m R} \varphi_2(I_m),$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (a + b(I_m \cos \Theta)^2)(-I_m \sin \Theta) \cos \Theta d\Theta. \quad (6)$$

Легко убедиться, что соотношение (6) тождественно равно нулю. Следовательно, первое приближение метода Ван-дер-Поля не дает ответа на вопрос о характере колебаний в рельсовой цепи. Это означает, что в первом приближении нелинейные эффекты в рельсовой цепи не проявляются. Такое заключение подтверждается практикой проектирования и эксплуатации рельсовых цепей. Как известно, существующие методики расчета и проектирования рельсовых цепей основаны на представлении рельсовой цепи системой линейных четырехполюсников или на графовом описании процессов в рельсовой цепи без учета ее нелинейности. Расчеты ведутся символическим методом, который применим без ограничений только к линейным цепям. Полученные результаты оказываются недостаточными для практики.

Далее рассматривается второе приближение метода Ван-дер-Поля, которое имеет вид

$$\dot{\Theta} = 1 - \frac{v\sqrt{G}}{I_m R} (a + b(I_m \cos \Theta)^2)(-I_m \sin \Theta) \cos \Theta. \quad (7)$$

В стационарном случае производная фазы равна нулю. Тогда из (7) получается уравнение для поправки к фазе, зависящей от амплитуды сигнала. Такая зависимость является нелинейным эффектом.

$$1 + \frac{v\sqrt{G}}{I_m R} (a I_m \sin \Theta \cos \Theta + b I_m^2 \cos^3 \Theta \sin \Theta) = 0. \quad (8)$$

Следовательно, в рельсовых цепях ферромагнитные свойства рельсовой стали вызывают нелинейный эффект второго порядка малости – паразитную фазовую модуляцию. Это один из возможных нелинейных эффектов, который может наблюдаться во многих нелинейных электрических устройствах. Учет такого эффекта необходим при разработке приемников сигналов рельсовых цепей, реализующих сложные процедуры обработки сигнала на основании современной теории связи.

Полученные в докладе результаты имеют полукачественный характер. В современной теории колебаний имеются методы, позволяющие описать процесс паразитной модуляции количественно и получить выражения для колебаний в рельсовой цепи.

Следует также указать, что в докладе уравнения (1) записаны для ненасыщенной стали рельс. При намагничении стали до насыщения (например, по причине воздействия тягового тока электрифицированной магистрали) аппроксимация вебер-амперной характеристики стали полиномом уже не описывает явление в стали с требуемой точностью. Требуется аппроксимация с насыщенным участком, например гиперболическими функциями или логистической кривой. Метод расчета процессов рельсовой цепи остается тем же.

Таким образом, в докладе метод расчета процессов в нелинейных цепях с распределенными параметрами апробирован для анализа рельсовых цепей с учетом ферромагнитных свойств рельсовой стали. Полученные результаты позволяют заключить, что для ненасыщенной стали нелинейные эффекты имеют второй порядок малости. Поэтому разработанные к настоящему времени методы расчета и проектирования рельсовых цепей сохраняют свою силу. Эффекты второго порядка малости не оказывают большого влияния на достоверность получаемых этими методами результатов. С другой стороны, выявление этих эффектов имеет несомненный теоретический и практический интерес. Также для развития теории рельсовых цепей имеет большое значение апробация методов анализа, основанных на достижениях современной теории колебаний и нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными.

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЬНЫХ ПУНКТОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКОМОТИВНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ**

*В. С. КУЗЬМИН*

*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

*П. М. МЕРКУЛОВ*

*АО «НИИАС», г. Москва, Российская Федерация*

Техническое обслуживание и ремонт локомотивных устройств безопасности является неотъемлемой частью мероприятий, направленных как непосредственно на поддержание помехоустойчивости их работы, так и на повышение уровня безопасности движения поездов. Проверка правильности функционирования локомотивных устройств безопасности, построенных как на релейной, так и на микропроцессорной элементной базе, осуществляется с применением путевых устройств, размещаемых на испытательных участках контрольных пунктов автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (КП АЛСН).

До настоящего времени основными документами, регламентирующими проектирование, оборудование, техническое обслуживание и ремонт КП АЛСН на сети железных дорог ОАО «РЖД», были:

Технические требования на оборудование контрольных пунктов АЛСН испытательными шлейфами «ИШ-74»;

Контрольный пункт АЛС. Методические указания по проектированию и оборудованию 36090-00-00 МУ, утв. 30 декабря 1996 г.;

Технические указания на выполнение работ по обслуживанию локомотивных и стационарных устройств на КП АЛСН № РМ 32 ЦШ 09.23-84, утв. 25 декабря 1984 г.

Среди основных недостатков указанных документов следует отметить отсутствие:

- допусков к высоте прокладки испытательного шлейфа;
- универсальных требований к прокладке испытательного шлейфа в зоне стыковой накладки;
- норм к прокладке испытательного шлейфа на КП АЛСН с рельсами типа Р75;
- требований по обеспечению электромагнитной совместимости испытательных участков КП АЛСН со светодиодными линиями освещения в смотровых канавах и силовым оборудованием;
- допусков к расстоянию между скрещиваниями испытательного шлейфа;
- универсальных требований к скрещиванию испытательного шлейфа, что приводит к значительным материальным затратам при реорганизации испытательного участка в случаях изменения серий обслуживаемого железнодорожного подвижного состава;
- требований к скрещиванию испытательного шлейфа для современных типов железнодорожного подвижного состава;
- единых требований к паспорту испытательного участка, проектной и рабочей документации, журналам КП АЛСН;
- требований к современным устройствам проверки АЛС, в том числе исполненных на микропроцессорной элементной базе.

Само по себе наличие трех самостоятельных нормативных документов, противоречащих в части технических решений друг другу, создает существенную сложность в техническом обслуживании локомотивных устройств безопасности в условиях КП АЛСН и не может не сказываться на его качестве. Однако имеет место и отсутствие однозначного понимания в вопросе статуса некоторых документов: так, несмотря на Письмо Министерства путей сообщения «О методических указаниях для КП АЛСН» от 25 сентября 1997 г. № ЦШТех-23/15, содержащего указания на применение Методических указаний 36090-00-00 МУ взамен Технических требований на оборудование контрольных пунктов АЛСН испытательными шлейфами «ИШ-74», в том числе для реконструкции существующих и строительства новых КП АЛСН, руководства по эксплуатации большинства локомотивных устройств безопасности, в частности КЛУБ-У (36991-00-00 РЭ, часть первая, номер изменения 275), до сих пор применяют требования к испытательным шлейфам, сходные с изложенными в Технических требованиях «ИШ-74».

Указанная проблема приводит в ряде случаев к несоответствию КП АЛСН актуальным нормативным документам, что, в свою очередь, приводит к снижению качества обслуживания локомотивных устройств безопасности и, как следствие, сбоям в их работе. Для решения указанной проблемы Дирекция по ремонту тягового подвижного состава – филиал ОАО «РЖД» поставила задачу создания единого нормативного документа: Инструкции по оборудованию, техническому обслуживанию и ремонту испытательных шлейфов и путевых устройств АЛС контрольного пункта АЛСН. Поставленная задача была успешно выполнена специалистами АО «НИИАС», а документ получил № 35002-000-00.

При разработке Инструкции была осуществлена оценка эффективности различных технических решений по организации испытательных участков КП АЛСН, в том числе варианты с применением рельсовых цепей.

В частности была предпринята попытка решить проблему, связанную с тем, что в ряде случаев при размещении двух и более тяговых подвижных составов в границах одного испытательного участка оказывалось невозможным осуществить надлежащую проверку локомотивных устройств безопасности при нормативной величине сигнального тока в испытательном шлейфе, т. к. происходили частые сбои на белый и красный огни локомотивного светофора. Указанный эффект связан с т.н. экранирующим влиянием рельсов, заключающимся в том, что за счёт индуктивной связи между испытательным шлейфом и рельсом в последнем протекает ток такой величины, что номинальной величины тока в испытательном шлейфе оказывается недостаточно для наведения в приемных локомотивных катушках ЭДС достаточной величины. Для нивелирования указанного эффекта были разработаны организационно-технические меры, в частности в технологию обслуживания КП АЛСН была введена оценка экранирующего влияния рельсов, заключающаяся в измерении посредством приемной катушки величины ЭДС, наводимой от тока в шлейфе номинальной величины при заданной его частоте. Приемная катушка, не подключенная к локомотивным устройствам безопасности, устанавливается над уровнем головки рельса на высоте 150 мм (от уровня головки рельса до нижней грани приемной катушки) без смещения относительно его оси. Если величина наведенной в приемной катушке ЭДС не соответствует установленному для ее типа диапазону значений, то определяется коэффициент экранирования, равный отношению измеренного значения ЭДС к минимальной величине ЭДС, наводимой в приемной катушке данного типа при номинальной величине тока в шлейфе и заданной частоте. Рассчитанным коэффициентом экранирования предлагается руководствоваться в дальнейшем в эксплуатации для определения эквивалентной величины тока в шлейфе. Коэффициент экранирования может быть также получен при помощи специализированного прибора ЭКРАН-М.

При рассмотрении технического решения по организации испытательного участка с рельсовой цепью было отмечено, что получаемый испытательный участок проектируется под конкретную серию локомотива и не позволяет разместить более одного локомотива на одном испытательном участке в отличие от испытательных участков, выполненных в соответствии с Методическими указаниями 36090-00-00, где представлялось возможным организовать испытательный участок практически любой длины для одновременного размещения большого количества локомотивов. При электрической тяге обязательным условием становится применение дроссель-трансформаторов, установка которых должна согласовываться со службой сигнализации, централизации и блокировки.

В соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» № 463/р от 2 марта 2020 г. Инструкция по оборудованию, техническому обслуживанию и ремонту испытательных шлейфов и путевых устройств АЛС контрольного пункта АЛСН была утверждена на период до 1 июля 2020 г., что позволило собрать обширный объем предложений по совершенствованию нормативного документа и его адаптации к различным местным условиям. В настоящее время специалистами АО «НИИАС» осуществляется подготовка по внесению необходимых изменений в Инструкцию. На основе проведенной работы на кафедре «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта начата разработка учебного пособия, направленного на изучение современных устройств проверки автоматической локомотивной сигнализации, вопросов проектирования и технического обслуживания путевых устройств КП АЛСН в соответствии с актуальными нормативными документами. Это, несомненно, позволит обеспечить высокое качество обслуживания локомотивных устройств безопасности в условиях КП АЛСН и снизить число их сбоев в пути следования.

## АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СТАНДАРТАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

В. Ф. КУСТОВ

*Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, г. Харьков*

Одним из важнейших этапов доказательства безопасности систем железнодорожной автоматики (СЖА) является расчет нормативных показателей функциональной безопасности (ФБ), значения которых должны быть научно обоснованными. При этом необходимо учитывать, что более жесткие нормативы по ФБ будут приводить к усложнению разработки СЖА и к их удорожанию, а менее жесткие – приводить к железнодорожным авариям и катастрофам. В международных и европейских стандартах регламентируют допустимые вероятности опасных отказов в час или интенсивности опасных отказов в расчете на одну функцию безопасности, которые обозначают SIL1–SIL4 [1, 2]. Необходимо отметить, что для систем управления с малым числом функций безопасности эти требования могут быть приемлемыми, но при большом числе ответственных функций требования по ФБ к системе снижаются пропорционально их числу, т. к. невыполнение любой функции безопасности приводит к опасному состоянию всей системы в целом. Например, для микропроцессорных систем централизации стрелок и сигналов (МПЦ) в среднем на одну централизуемую стрелку приходится более десяти ответственных функций, поэтому для МПЦ с числом стрелок 100 европейские нормы по уровням полноты безопасности (SIL1–SIL4) будут в тысячу раз менее жесткими, чем требования вышеуказанных стандартов. Так, расчетная вероятность опасных отказов на систему МПЦ (1000 функций безопасности) для уровня SIL4 ( $10^{-9}$ – $10^{-8}$ ) согласно стандартов EN50129 и IEC 61508 [1, 2] за 10 лет работы составит 0,0839–0,5835, а за 20 лет работы – 0,1607–0,8266. Очевидно, что такие требования к СЖА являются недопустимыми и требуют пересмотра норм ФБ, приведенных в базовых стандартах EN и IEC.

В докладе предлагаются следующие методы обоснования нормативов ФБ [3].

### **1 Обоснование допустимой интенсивности опасных отказов функций безопасности по методу сравнения уровней безопасности с безопасностью железнодорожных реле 1-го класса надежности.**

Учитывая, что релейные СЖА обеспечивают приемлемую безопасность движения поездов, а реле 1-го класса надежности успешно выполняют ответственные функции безопасности, допустимую интенсивность опасных отказов в расчете на одну функцию безопасности для наиболее жесткой нормы SIL4 можно установить по эксплуатационной (фактической) интенсивности опасных отказов реле 1-го класса надежности:  $\lambda_{\text{оп.доп}} \leq \lambda_{\text{оп.реле1}}$ .

По данным эксплуатации за 5 лет на железных дорогах бывшего СССР у 16 млн электромагнитных реле 1-го класса надежности было зафиксировано девять опасных отказов, т.е. допустимая интенсивность опасных отказов функций безопасности составляет величину  $\lambda_{\text{оп.доп}} \leq 0,128 \cdot 10^{-10}$  1/ч.

### **2 Обоснование допустимой интенсивности опасных отказов функций безопасности по методу сравнения с допустимым числом опасных отказов за определенный период эксплуатации систем.**

Допустимая интенсивность опасных отказов для уровней безопасности SIL1–SIL4 определяется по допустимому числу опасных отказов за период эксплуатации систем:

$$\lambda_{\text{оп.доп}} = \frac{n_{\text{оп.доп}}(t)}{tN_{\text{оф}}}, \quad (1)$$

где  $n_{\text{оп.доп}}(t)$  – допустимое число опасных отказов функций безопасности за время  $t$  для каждого нормируемого уровня SIL1–SIL4;  $t$  – период эксплуатации системы;  $N_{\text{оф}}$  – число функций безопасности при серийной эксплуатации систем (должно быть статистически достаточным для приемлемой доверительной вероятности получаемых результатов).



### 3 Обоснование допустимой интенсивности опасных отказов функций безопасности по методу полного исключения опасных отказов за определенный период эксплуатации системы.

Допустимая интенсивность опасных отказов ответственных функций для исключения опасных отказов за определенный период эксплуатации систем (появления менее 1-го опасного отказа) будет определяться следующим выражением:

$$\lambda_{\text{оп.доп}} \leq \frac{1}{tN_{\text{оф}}}. \quad (2)$$

Так, на железных дорогах Украины (14-е место в мире по протяженности железных дорог) эксплуатируется около 45 тысяч централизованных стрелок, соответственно 450 тысяч ответственных функций в системах управления стрелками и сигналами. Для исключения возможности появления в них опасных отказов за период эксплуатации 20 лет (175200 ч) допустимое их значение для нормируемого уровня SIL4, с учетом формулы (2),  $\lambda_{\text{оп.доп}} = 0,127 \cdot 10^{-10} 1/\text{ч}$ . Указанное значение является практически аналогичным результату, приведенном в п.1 и стандарте ДСТУ 4178 по ФБ.

### 4 Обоснование допустимой интенсивности опасных отказов функций безопасности по нормируемой интенсивности опасных отказов систем.

Межгосударственные стандарты (МГС) нормируют ФБ на систему в целом или условный измеритель, например, на малую или крупную железнодорожную станцию, систему путевой блокировки, 1 км протяженности линии, один переезд и т. п. Учитывая, что количество ответственных функций  $N_{\text{оф}}$  в таких системах будет отличаться и даже значительно, предлагается определять допустимую интенсивность опасных отказов в расчете на одну функцию безопасности следующим образом:

$$\lambda_{\text{оп.доп}} \leq \frac{\lambda_{\text{оп.доп.общ}}}{N_{\text{оф}}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{оп.доп.общ}}$  – допустимая нормативная интенсивность опасных отказов в расчете на систему в целом или условный измеритель.

### 5 Обоснование допустимой интенсивности опасных отказов функций безопасности по методу замещения рисков.

Допустимую интенсивность опасных отказов функции безопасности предлагается определять на основании данных статистики числа опасных отказов эксплуатируемых систем с приемлемой для общества безопасностью:

$$\lambda_{\text{оп.доп}} \leq \frac{n_{\text{оп.э}}(t)K}{100tN_{\text{оф.э}}}, \quad (4)$$

где  $n_{\text{оп.э}}(t)$  – число опасных отказов большого числа эксплуатируемых систем за определенный период эксплуатации  $t$ ;  $K$  – процент опасных отказов функций безопасности, вызванных конструктивными особенностями комплектующих элементов, от общего числа опасных состояний системы по данным их эксплуатации;  $N_{\text{оф.э}}$  – число ответственных функций, находящихся в эксплуатации (статистика должна обеспечить высокий уровень доверительной вероятности).

В докладе приводятся результаты расчета допустимой интенсивности опасных отказов функции безопасности для указанных методов с учетом межгосударственных, европейских и международных стандартов по функциональной безопасности СЖА, на основании которых дается вывод о недостатках нормативов ФБ в принятых стандартах и пути усовершенствования их.

В докладе приводятся результаты обоснования допустимой наработки до опасного отказа отдельных каналов резервирования СЖА в зависимости от всех возможных способов резервирования, допустимых уровнях ФБ, законах распределения опасных отказов каналов резервирования и максимально допустимых периодах диагностирования и устранения опасных отказов. Такой этап подтверждения ФБ на этапе эксплуатации позволяет выявить ошибки, объективно существующие на каждом этапе доказательства безопасности СЖА, и исключить катастрофические последствия, связанные с ними. В случае появления опасного отказа в любом отдельном канале резервирования

раньше допустимого нормативного значения принимается решение о недостоверности доказательств безопасности СЖА и срочном выявлении причин появления опасного отказа, которыми могут быть дестабилизирующие факторы, которые не были учтены в полной мере при вводе СЖА в эксплуатацию (неточные данные по безопасности комплектующих элементов, новые источники электромагнитных помех от мобильной связи, электротяги и т. п.).

#### Список литературы

1 IEC 61508-1:1998. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. – Part 1: General requirements.

2 CENELEC-EN 50129. Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signaling, 2018.

3 Ensuring railroad's digital automation systems resistance to dangerous states / S. Panchenko [et al.] // ICTE in Transportation and Logistics. ICTE Tol 2019, LNITI. – 2020. – P. 120–128.

УДК 656.25

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО ДЛЯ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

*Д. Д. МЕДВЕДЕВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Рельсовые цепи являются базовыми элементами современных систем железнодорожной автоматики и телемеханики, выполняя ответственные функции путевых датчиков и телемеханических каналов. Надежная работа рельсовых цепей во многом определяет нормальное функционирование систем железнодорожной автоматики и телемеханики, обеспечивая тем самым безопасность движения поездов и регулярность перевозочного процесса.

Надежная работа рельсовой цепи во всех режимах обеспечивается за счет правильного расчета параметров рельсовой цепи при определенных параметрах рельсовой линии и выполняется при проектировании и модернизации участков железной дороги.

При анализе и расчете рельсовых цепей предполагается, что рельсовая линия и элементы аппаратуры являются линейными, то есть их параметры не зависят от протекающих токов. Для упрощения расчетов рельсовых цепей представляют соответствующей математической моделью (схемой замещения) для каждого режима. В зависимости от вида применяемой схемы замещения различают четырехполюсные и многополюсные модели. Классический метод расчета основан на использовании четырехполюсных моделей [1, 2].

Разработанное автоматизированное рабочее место позволяет решить следующие задачи:

- выполнить расчет рельсовой цепи во всех режимах функционирования;
- построить регулировочные таблицы при новом проектировании или модернизации участка пути;
- анализировать выполнение требований функционирования рельсовой цепи во всех режимах для наихудших условий как элементов рельсовой цепи, так и параметров рельсовой линии;
- накапливать статистическую информацию о влиянии параметров элементов рельсовой цепи и рельсовой линии на надежность функционирования рельсовой цепи;
- хранить информацию о схеме замещения рельсовой цепи;
- хранить информацию о элементах, входящих в рельсовую цепь;
- оперативно строить и анализировать схемы замещения рельсовой цепи.

Автоматизированное рабочее место состоит из нескольких взаимосвязанных модулей.

Модуль ввода элемента в эквивалентную схему релейного или питающего конца позволяет добавлять в базу элементов новый четырехполюсник, частично отредактировать существующий (с ограниченными правами доступа редактирования). Выбрать существующий элемент из базы с параметрами его функционирования: частота, коэффициент трансформации и схема включения. Простейшие элементы, такие как индуктивность, сопротивление, емкость со схемами их включения, могут быть автоматически представлены в виде четырехполюсника с рассчитанными параметрами. Также автоматизированное рабочее место может быть дополнено модулем связи с микропроцес-

сорным измерителем параметров четырехполюсников, выполняющий функцию расчета параметров измеренного элемента рельсовой цепи, представленного эквивалентным четырехполюсником.

При составлении схем замещения, релейного и питающего концов производится выбор и установка в соответствующем порядке необходимых эквивалентных четырехполюсников рельсовой цепи. Структура соответствующего конца рельсовой цепи визуализируется в виде таблицы элементов. Информация о схеме замещения релейного и питающего конца сохраняется в базе данных.

Модуль расчета рельсовой линии позволяет задать такие параметры, как длина рельсовой линии, сопротивление изоляции рельсов, границы измерения сопротивления изоляции рельсов, удельное сопротивление рельсов, рабочую частоту рельсовой цепи, коэффициент взаимной индукции рельсов, тип рельсовой цепи (неразветвленная, разветвленная, стыковая, бесстыковая) и вид тяги.

Для выполнения данных задач был разработан ряд программных библиотек:

– библиотека работы с комплексными числами – позволяет представлять комплексное число в различных формах (тригонометрическая и алгебраическая) и выполнять с ним необходимые математические операции;

– библиотека работы с матрицами комплексных чисел;

– библиотека расчета четырехполюсника рельсовой линии по его первичным параметрам;

– библиотека расчета четырехполюсника релейного и питающего конца по структурной схеме замещения, представленной в виде таблицы элементов, входящих в состав соответствующего конца;

– библиотека связи базы данных с таблицей элементов и таблицей;

– библиотека сохранения результата проектирования (эквивалентная схема) в базе данных;

– библиотека формирования отчета в виде регулировочной таблицы при необходимости.

Разработанное программное обеспечение автоматизированного рабочего места для расчета и анализа параметров рельсовых цепей позволяет визуализировать структуру рельсовой цепи, анализировать работу рельсовой цепи при различных режимах её функционирования и формировать отчет о рассчитанных регулировочных характеристиках (регулирующая таблица).

#### Список литературы

1 Аркатов, В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М. : Транспорт, 1990. – 295 с.

2 Рельсовые цепи магистральных железных дорог : справочник / В. С. Аркатов [и др.]. – 3-е изд. – М., 2006. – 496 с.

УДК 658.5.017.7

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕРВИСА ОБЛАЧНОГО ХРАНИЛИЩА ДЛЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

*Н. В. РЯЗАНЦЕВА, Г. Р. АЗИМОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*В. Н. СТРИЛЕЦ*

*ООО «ТВС-инженеринг», г. Гомель, Республика Беларусь*

Инфраструктура железнодорожного транспорта включает в себя большое число объектов, в том числе и таких, нарушение функционирования которых создает угрозу нормальной работе системы в целом. В настоящее время наблюдается тенденция широкого внедрения информационных технологий, в том числе в область управления объектами инфраструктуры. С этой точки зрения разработка сервиса удаленного управления с помощью мобильного приложения является весьма актуальной задачей в связи с тем, что применение новейших IT-технологий позволяет экономить время и людские ресурсы при высоком качестве обеспечения работы.

Рассмотрим разработку системы удаленного управления с помощью мобильного устройства. Использование таких систем приводит к росту информации о характеристиках систем и, как следствие, проблемам с её хранением. Отдельно стоит отметить, что сбой системы несёт угрозу в виде потери либо кражи информации. Это обусловлено тем, что зачастую вся информация хранится локально на ПК, который работает постоянно без отключения и перезапусков. Следовательно, необ-

ходимо создать условия для хранения и защиты информации, при которых все данные будут храниться не только локально, но и глобально, в облачных хранилищах.

Технологии использования сервиса облачного хранилища для мониторинга и управления объектами в режиме реального времени были применены для создания системы удаленного управления насосной станцией с помощью мобильного устройства. Комплекс эксплуатируется в удаленном режиме с использованием средств автоматики, а также с применением расположенного около скважины операторского пульта. Диспетчерское управление работой системы водоснабжения осуществляется с использованием системы диспетчерского управления и сбора данных SCADA, что позволяет выводить данные о системе в виде мнемосхем, графиков, таблиц, отображающих состояние агрегатов и устройств с указанием ключевых эксплуатационных параметров. Данные позволяют диспетчеру эффективно контролировать ситуацию и принимать необходимые решения. На расположенном в пункте диспетчерского управления сервере находится архив данных о функционировании системы, используемых для аналитических и статистических исследований, а также при планировании работы системы водоснабжения и расчете объема аварийного резервирования чистой воды. Приложение для управления АСУ ТП подразумевает автоматическую обработку и хранение информации о управляемой системе, для последующего управления. В нашем случае мы можем выделить следующие компоненты структуры верхнего уровня автоматизации: программируемый логический контроллер (ПЛК); OPC-сервер (OwenCloud); SCADA-система (сервер SCADA-системы); автоматизированное рабочее место (АРМ) (рисунки 1, 2).

Было разработано мобильное приложение для управления насосной станцией второго подъема, находящейся по адресу: п. Колодищи Минского района. Разработка производилась в среде Android Studio. Мобильное приложение выполняет следующие задачи: представление мнемосхем на экране мобильного телефона; архивация данных; просмотр графиков расхода воды; управление работой насосных агрегатов. Переменные сервера SCADA-системы являются копией переменных ПЛК. Данные об изменениях на АРМ отправляются на ПЛК, что вызывает ответную реакцию в виде изменения показателей приборов. На АРМе имеется ряд экранов, взаимодействие с которыми осуществляется с помощью мобильного приложения.

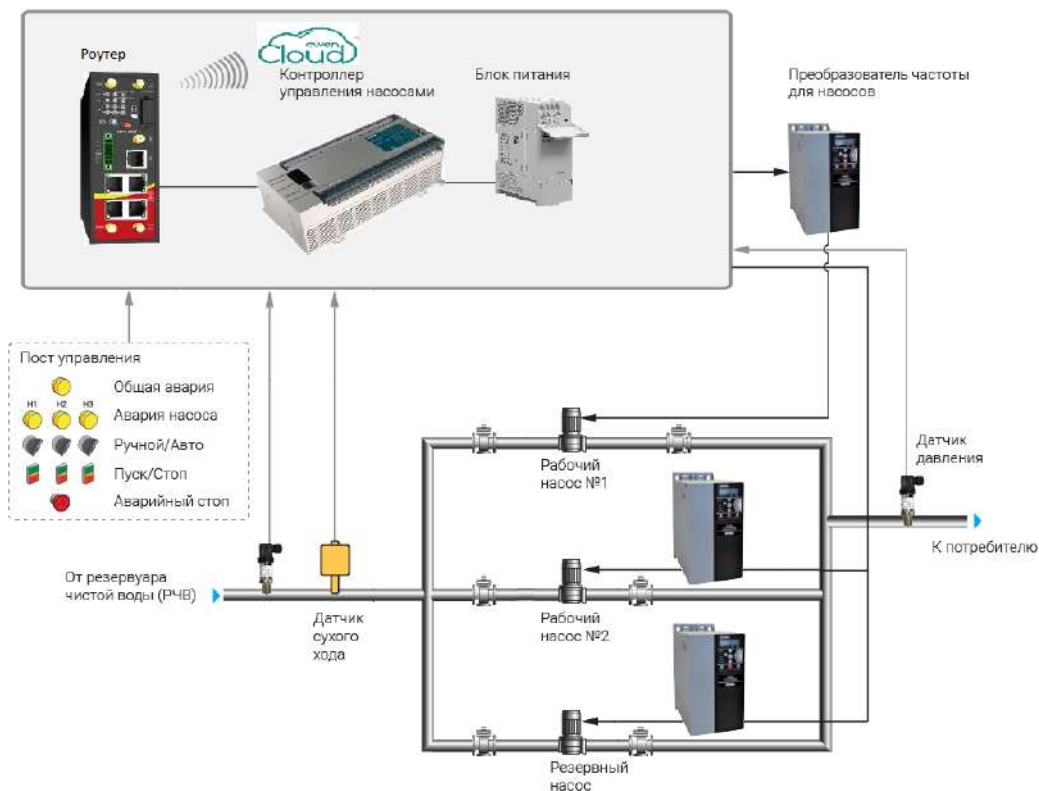


Рисунок 1 – Функциональная схема системы автоматизации

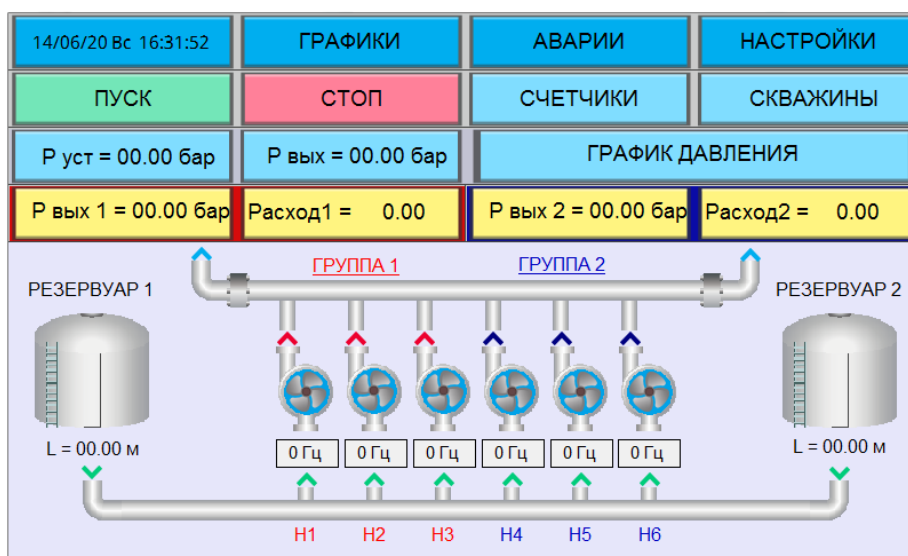


Рисунок 2 – Главный экран мониторинга и управления ПНС

Анализ результатов тестирования системы показывает, что использование сервиса облачного хранилища при разработке ПО, помимо локального сервера СКАДА-системы, позволяет получить возможность контролировать и управлять системой в любое время из любого места, а также повысить надежность работы системы за счет увеличения ее информационной безопасности, с помощью дополнительного шифрования канала связи и облачным хранением архивных данных работы.

УДК 65.011.56

## ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА МАРШРУТА СЛЕДОВАНИЯ ПАССАЖИРА В РЕГИОНАЛЬНОМ СООБЩЕНИИ

*Н. В. РЯЗАНЦЕВА, Е. А. ЖИДКОВА*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Одной из основных тенденций развития Белорусской железной дороги является ее компьютеризация, в частности, внедрение информационно-вычислительных систем, однако остаются некоторые задачи, которые сложно компьютеризировать. Одной из таких задач является разработка информационно-поисковых систем маршрута следования пассажира в региональном сообщении с выбором оптимальных вариантов пересадки при отсутствии прямого маршрута. Сложность заключается в том, что данная задача является *NP*-полной и одним из лучших методов ее решения является полный перебор. Однако логический выбор и полный перебор вариантов решения данной задачи, даже с использованием компьютерных технологий, занимает значительное время, следовательно, для решения такой задачи нужно использовать различные методы оптимизации нахождения решений.

Подобные программные продукты существуют для городского общественного транспорта, для метро г. Минска, г. Москвы и г. Санкт-Петербурга, а также для авиAPERелетов международных авиакомпаний. Данные информационно-поисковые системы позволяют пассажирам выбрать не только прямой маршрут, но и маршруты с пересадками, при этом пассажиру не приходится вручную подбирать и согласовывать время прибытия, отправления различных маршрутов, высчитывать время в пути и пересадки между маршрутами. В Беларуси в настоящее время нет аналогичных программ, позволяющих находить удобный маршрут следования с возможностью пересадки для железнодорожного транспорта, как в региональном, так и в межрегиональном сообщении. Данная программа будет востребована билетными кассирами и позволит повысить качество их обслуживания.

Для поиска алгоритма нахождения оптимального маршрута следования пассажира за минимально возможное время были исследованы алгоритмы, основанные на графах. Графы являются существенным элементом математических моделей в самых разнообразных областях науки и прак-

тики и помогают наглядно представить взаимоотношения между объектами или событиями в сложных системах. Алгоритмы работы графов используются при создании различных информационных систем, связанных со схемами маршрутов передвижения, техническими схемами устройств, организационными схемами управления, с решением задач сетевого планирования. Применение графов позволяет решить множество задач: найти оптимальный маршрут на карте дорог; рассчитать максимальное время выполнения проекта (критический путь); определить, сколько элементов должно выйти из строя, чтобы отказал весь механизм и т. д.

Для реализации информационно-поисковой системы выбора маршрута следования пассажира в региональном сообщении был выбран алгоритм Дейкстры. Данный алгоритм решает задачу нахождения кратчайших путей для единственного источника на ориентированных графах, имеющих неотрицательные веса, и основан на методе поиска в ширину. Работу алгоритма Дейкстры можно описать последовательностью действий:

- поиск начинается путем помещения источника в просмотренную зону;
- на каждом шаге добавляется одно ребро, дающее кратчайший путь из источника в вершину, не включенную в просмотренную зону, то есть вершины добавляются в просмотренную зону в порядке возрастания их удаленности от источника.

Таким образом, чтобы найти кратчайший путь от  $s$  к  $t$  с помощью алгоритма Дейкстры, достаточно начать поиск с вершины  $s$  и закончить его, когда вершина  $t$  добавится в очередь.

Программная реализация информационно-поисковой системы выбора маршрута следования пассажира в региональном сообщении представлена в виде основного программного модуля, реализованного на языке C++, и удаленной базы данных, реализованной с помощью СУБД InterBase. Такой выбор связан с имеющимся оборудованием и программным обеспечением, используемым на железной дороге.

Основной программный модуль реализует принцип разделения пользователей по уровню доступа для исключения ошибочного изменения информации, которое может повлиять на корректную работу программы. Дежурный по станции после аутентификации имеет доступ ко всем функциям изменения информации в программе: модификации данных об остановках, расписании движения поездов, времени хода между станциями. При вводе начальной и конечной станции выдается список поездов, подходящих по заранее выбранным критериям поиска.

Для выполнения модификации данных, их анализа и поиска оптимального маршрута пассажира с помощью алгоритма Дейкстры основной программный модуль формирует SQL-запросы к удаленной базе данных. База данных представлена связанными таблицами, в которых присутствует следующая информация:

- таблица «Станции»: идентификатор станции, название станции;
- таблица «Перечень поездов»: идентификатор поезда, номер поезда, название поезда, начальная и конечная дата движения поезда согласно расписанию;
- таблица «Расписание движения поездов по станции»: идентификатор поезда, идентификатор станции, время прибытия, время отправления;
- таблица «Граф расположения станций»: идентификатор графа, идентификатор первой станции, идентификатор второй станции, расстояние между станциями;
- таблица «Узловые станции»: идентификатор станции, идентификатор первой узловой станции, идентификатор второй узловой станции.

При вводе начальной и конечной станции, времени и даты отправления начинается поиск маршрута. На первом этапе поиска осуществляется проверка наличия ближайшего по времени прямого маршрута, без пересадок. Второй этап начинается, если прямого маршрута не существует. Формируется запрос к базе данных, выбирающий узловые станции для станций отправления и прибытия. Затем от двух узловых станций, относящихся к станции отправления, запускается алгоритм Дейкстры, причем для ускорения поиска в качестве весов выбираются расстояния между узловыми станциями. Алгоритм позволяет получить до четырех вариантов маршрутов, от каждой узловой станции к каждой. Далее вызывается процедура расчета расстояний от начальной и конечной станции к ее узловым станциям и, прибавляя расстояние, найденное в ходе выполнения алгоритма Дейкстры, выдается кратчайший по расстоянию маршрут. После этого по выбранным узловым станциям происходит подбор маршрута с согласованием даты и времени прибытия и отправления поездов (рисунок 1).

Поезд	Название	Станция	Отправление	Станция	Прибытие	Поезд	Название	Станция	Отправление	Станция	Прибытие
6580	Осиповичи - Могилев	Друть	5:50:00	Могилев-1	7:07:00	6557	Могилев - Жлобин	Могилев-1	8:15:00	Быхов	9:39:00
6580	Осиповичи - Могилев	Друть	5:50:00	Могилев-1	7:07:00	6559	Могилев - Жлобин	Могилев-1	17:35:00	Быхов	18:48:00
6582	Осиповичи - Могилев	Друть	9:39:00	Могилев-1	10:54:00	6511	Могилев - Жлобин	Могилев-1	12:24:00	Быхов	13:37:00
6582	Осиповичи - Могилев	Друть	9:39:00	Могилев-1	10:54:00	6559	Могилев - Жлобин	Могилев-1	17:35:00	Быхов	18:48:00
6584	Осиповичи - Могилев	Друть	11:31:00	Могилев-1	12:40:00	6559	Могилев - Жлобин	Могилев-1	17:35:00	Быхов	18:48:00
6514	Осиповичи - Могилев	Друть	9:39:00	Могилев-1	10:54:00	6511	Могилев - Жлобин	Могилев-1	12:24:00	Быхов	13:37:00
6514	Осиповичи - Могилев	Друть	9:39:00	Могилев-1	10:54:00	6559	Могилев - Жлобин	Могилев-1	17:35:00	Быхов	18:48:00
6514	Осиповичи - Могилев	Друть	9:39:00	Могилев-1	10:54:00	6511	Могилев - Жлобин	Могилев-1	12:24:00	Быхов	13:37:00
6514	Осиповичи - Могилев	Друть	9:39:00	Могилев-1	10:54:00	6559	Могилев - Жлобин	Могилев-1	17:35:00	Быхов	18:48:00

Рисунок 1 – Результат поиска маршрута с пересадками

Для работы с программой разработан интуитивно понятный дружественный оконный интерфейс пользователя, предусмотрено наличие контекстного меню и интегрированной справочной системы помощи. Анализ результатов тестирования информационно-поисковой системы выбора маршрута следования пассажира в региональном сообщении показал корректность результатов работы.

УДК 656.25

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ЕВРОПЕЙСКИХ НОРМАХ И ГОСТ

*С. Н. ХАРЛАП*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Ввод в эксплуатацию современных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики в обязательном порядке включает в себя процедуру подтверждения соответствия требованиям функциональной безопасности. Основным количественным показателем функциональной безопасности является интенсивность опасных отказов. Этот показатель используется для определения уровня полноты безопасности (УПБ, SIL) в международных (IEC), европейских (EN), межгосударственных (ГОСТ) и национальных стандартах (СТБ, ГОСТ Р). Общая тенденция последних лет явно показывает сближение нормативной базы Европейского Союза и Евразийского экономического союза за счет применения единых стандартов МЭК, что выражается в принятии ряда национальных и межгосударственных стандартов, идентичных международным и европейским стандартам, например, СТБ IEC 61508-2014, СТБ EN 50126-1-2011, ГОСТ Р МЭК 61508-2012, ГОСТ IEC 61508-3-2018. Аутентичный перевод этих стандартов приводит к тому, что у нас начинают действовать нормы, принятые в Европейском союзе. Поэтому актуальным является сравнение методов расчета и норм количественных показателей функциональной безопасности в европейских нормах и ГОСТ.

Перед выполнением анализа следует уточнить, что основополагающим «вертикальным» стандартом верхнего уровня для функциональной безопасности является IEC 61508 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью». Общие положения IEC 61508 детализированы для потенциально опасных областей. В частности, для систем железнодорожной автоматики количественные показатели безопасности установлены IEC 62425 (EN 50129) «Железные дороги. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Электронные системы сигнализации, связанные с безопасностью». Несмотря на то, что требования и нормы в IEC 62425 установлены с учетом требований IEC 61508, существуют некоторые отличия в методах расчета показателей безопасности.

В международных (IEC 61508-1, IEC 62425), европейских (IEC 62425) для определения уровня полноты безопасности используется приведенный показатель «допустимая интенсивность опасных отказов в час и на одну функцию». В ГОСТ 33894–2016 «Системы железнодорожной автоматики и телемеханики на железнодорожных станциях. Требования безопасности и методы контроля» применяются показатели «интенсивность опасных отказов в час на железнодорожную станцию (при числе стрелок до 22 включительно)» и «интенсивность опасных отказов в час на централизованную

стрелку». Для перегонных систем железнодорожной автоматики в ГОСТ 33895–2016 установлены показатели «интенсивность опасных отказов в час на один километр длины перегона, оснащенного автоматической блокировкой» и «интенсивность опасных отказов в час на перегон, оснащенный полуавтоматической блокировкой».

Таким образом, очевидно, что для нормирования количественных показателей функциональной безопасности в различных стандартах используется интенсивность опасных отказов в час, приведенная к различным единицам измерения, что делает невозможным принятие однозначного решения о соответствии системы автоматики требованиям ГОСТ, если она имеет сертификат соответствия требованиям EN, без дополнительных расчетов. Это же утверждение верно и в обратную сторону.

В качестве примера рассмотрим безопасную систему железнодорожной автоматики, состоящую из  $N$  функциональных блоков. Каждый блок выполняет какую-то часть функций безопасности и имеет интенсивность опасных отказов равную  $\lambda_i$ , где  $i$  – номер блока. Система полностью управляет одной железнодорожной станцией с числом стрелок меньше 22.

Рассмотрим несколько возможных конфигураций системы:

1 При выполнении любой функций безопасности задействованы все функциональные блоки.

2 Каждый блок выполняет свою функцию безопасности, все функции независимы, отказ любого блока может повлиять только на функцию, выполняемую этим блоком, и не влияет на выполнение остальных функций.

3 В выполнении функций безопасности задействовано произвольное количество блоков. Один и тот же блок может участвовать в выполнении нескольких функций безопасности.

Оценим безопасность данной системы по методологии, изложенной в EN.

Определим интенсивность опасных отказов при выполнении каждой функции безопасности для первого случая. Так как при выполнении любой функций безопасности задействованы все функциональные блоки, то интенсивности опасных отказов всех функций будут одинаковы и равны сумме интенсивностей отказов всех блоков:

$$\lambda_{\Phi} = \sum_1^N \lambda_i.$$

Общая безопасность системы будет равна интенсивности опасных отказов функции, т. е.

$$\lambda_{o1} = \lambda_{\Phi}.$$

Во втором случае каждый блок выполняет свою функцию безопасности, все функции независимы, отказ любого блока может повлиять только на функцию, выполняемую этим блоком, и не влияет на выполнение остальных функций, поэтому интенсивность опасных отказов функции будет равна интенсивности опасных отказов блока:

$$\lambda_{\Phi i} = \lambda_i.$$

Общая безопасность системы оценивается по интенсивности опасных отказов функции, имеющей наибольшее значение, т. е.

$$\lambda_{o2} = \lambda_{\Phi i \max}$$

и она будет всегда меньше, чем интенсивность опасных отказов, полученная в первом случае:

$$\lambda_{o2} < \lambda_{o1}.$$

В третьем случае в выполнении функций безопасности задействовано произвольное количество блоков, следовательно, интенсивности опасных отказов каждой функции будут равны сумме интенсивностей отказов блоков, задействованных при реализации этой функции:

$$\lambda_{\Phi k} = \sum_1^m \lambda_i.$$

Общая безопасность системы оценивается по интенсивности опасных отказов функции, имеющей наибольшее значение, т. е.

$$\lambda_{o3} = \lambda_{\Phi k \max}$$

и она будет не больше, чем интенсивность опасных отказов, полученная в первом случае и не меньше, чем интенсивность опасных отказов, полученная во втором случае:

$$\lambda_{o2} \leq \lambda_{o3} \leq \lambda_{o1}.$$

В соответствии с ГОСТ опасным отказом системы считается невыполнение хотя бы одной функции безопасности. Поэтому методика определения интенсивности опасных отказов системы не зависит от рассмотренных конфигураций и равна сумме интенсивностей отказов всех блоков:



$$\lambda_0 = \sum_1^N \lambda_i.$$

Рассмотренный пример показывает, что:

1 Методы расчета показателей безопасности по EN и ГОСТ различны.

2 Интенсивность опасных отказов системы в целом, полученная по ГОСТ, зависит только от количества используемого оборудования и их показателей безопасности и не зависит от распределения функций безопасности между этим оборудованием. Интенсивность опасных отказов системы в целом, полученная по EN, дополнительно зависит от распределения функций безопасности между блоками.

3 Интенсивность опасных отказов системы в целом, полученная по ГОСТ при использовании приведенных показателей «на железнодорожную станцию» и «на перегон», всегда не меньше, чем интенсивность опасных отказов системы в целом, полученная по EN. То есть

$$\lambda_{0\text{EN}} \leq \lambda_{0\text{ГОСТ}}.$$

В этом случае, если принять, что в нормативных документах будут установлены одинаковые требования к системе по интенсивности опасных отказов, то система, соответствующая требованиям по ГОСТ, всегда будет соответствовать EN, а вот для системы, соответствующей требованиям по EN, потребуется делать дополнительный расчет для подтверждения соответствия ГОСТ.

Однако следует учесть, что показатель «интенсивность опасных отказов в час на железнодорожную станцию (при числе стрелок до 22 включительно)» в ГОСТ 33894–2016 имеет значение менее  $10^{-7}$  1/ч на станцию, в то время как для уровня полноты безопасности SIL4, к которому относят системы железнодорожной автоматики, он составляет менее  $10^{-8}$  1/ч на одну функцию. Поэтому для принятия решения о соответствии недостаточен сам факт соответствия ГОСТ, необходимо дополнительно анализировать результаты расчета показателей и их точные значения.

При использовании приведенных показателей «на стрелку» и «на километр перегона», очевидной зависимости между показателями нет, поэтому в обязательном порядке должен выполняться расчет показателей функциональной безопасности по соответствующей методике.

УДК 656.25

## **ОБЗОР ЛОКОМОТИВНЫХ УСТРОЙСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЯХ**

*С. Н. ХАРЛАП*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Р. И. ЗАНЬКО*

*Государственное предприятие Институт Белжелездорпроект, г. Гомель, Республика Беларусь*

Одним из перспективных направлений развития железнодорожного транспорта является внедрение беспилотных технологий управления. В соответствии со стандартом МЭК-62290-1 железнодорожный транспорт имеет четыре степени автоматизации:

- 1) ведение машинистом;
- 2) ведение машинистом с функцией автоведения;
- 3) автоведение без машиниста;
- 4) полностью беспилотное.

Третий и четвертый уровень автоматизации в обязательном порядке требует внедрения системы технического зрения. Для этих систем одной из важнейших функций, связанной с безопасностью движения, является функция обнаружения препятствий на железнодорожных путях.

В настоящий момент проекты по достижению уровней 3 и 4 реализуют ведущие компании мира, такие как *Siemens, Alstom, Thales, SNCF, SBB* и другие. Рассмотрим основные подходы, применяемые различными компаниями для решения этой задачи.

*SIRIO-OD* – итальянская автоматическая система, предотвращающая столкновения и обнаруживающая препятствия, преграждающие движение поездов в зонах повышенного риска. Принцип работы основан на отражении сигнала от препятствующих объектов. Работает при установке от двух до четырех радиолокационных датчиков (*RSR radar*), независимо подключённых к системе сигнала.

лизации и одного внешнего шкафа. Из положительных качеств данной системы стоит подчеркнуть эффективную работу в сложных погодных условиях, предотвращение столкновений поездов, движущихся на высоких скоростях (до 350 км/ч), а также низкие затраты на обслуживание. Недостатками являются: минимальное обнаруживаемое препятствие не должно быть меньше сферы диаметром 60 см и статичность системы в целом.

Спроектированы сербскими (в рамках проекта *SMART*) и шведскими (кафедрой электротехники Липчепингского университета) разработчиками системы обнаружения препятствий на основе тепловизионных камер. Камера такого типа была выбрана по причине независимости её от освещения и работоспособности в полной темноте. Её устанавливают на локомотиве в защитном корпусе. Изображения подаются в компьютер и обрабатываются искусственным интеллектом, после чего подаются на монитор, установленный в локомотиве, рядом с машинистом. В случае обнаружения опасности, система извещает машиниста сигналом тревоги. Преимуществом системы является возможность работать в любое время суток и возможное распознавание аномалий на расстоянии до километра. Недостатком можно обозначить низкое разрешение подобных камер, из-за чего дальность распознавания препятствий может быть недостаточной для полной остановки поезда.

*Main Line System* – система, разработанная израильской компанией *Rail Vision*. Представлена чувствительными датчиками изображения с искусственным интеллектом. В отличие от предыдущего проекта, вместо одной термокамеры установлен электрооптический блок, содержащий в себе три камеры разных типов (мультиспектральная камера, термокамера и камера ночного видения), что позволяет распознавать препятствия на более дальнем расстоянии (до 2000 м – автомобили, 1500 м – люди). Также система способна различать сигнализацию и состояние стрелочных переводов (до 350 м). При обнаружении опасности извещения получает не только машинист, но и диспетчер. Плюсами данной системы являются дальность действия и возможность работать в любых погодных и световых условиях.

*SMART* – европейская система, разработанная тремя странами: Германией, Болгарией и Сербией. Она является мультисенсорной, в её состав входят различные технологии распознавания препятствий: две пары стереокамер, тепловизионная камера, камера ночного видения (с усилителем изображения) и лидаром (англ. *LIDAR* расшифровывается как «*Light Identification Detection and Ranging*» – дословно, система световой идентификации, обнаружения и определения дальности). Такое количество устройств обусловлено их слабыми сторонами по отдельности, за счёт их объединения недостатки одних заменяются преимуществами других. Но это значительно увеличивает цену на систему и её обслуживание. *SMART* рассчитана на обнаружение препятствий на средней (200 м) и дальней (1000 м) в любое время эксплуатации и при условиях плохой видимости.

Компания ОАО «РЖД» также ведет разработку беспилотных железнодорожных транспортных средств. Так, на станции Лужской в 2015 году стартовал проект по автоматизации движения трех маневровых локомотивов, где интегратором проекта и разработчиком базовых технологий выступил АО «НИИАС». Совместно с АО «НИИАС» участвуют такие компании, как:

- АО «ВНИКТИ» в части разработки бортовой системы управления;
- Siemens – в части автоматизации работы сортировочной горки (система *MSR-32*) и автоматизации выполнения операции надвига вагонов;
- АО «Радиоавионика» в части систем микропроцессорной централизации, управляющей стрелками, светофорами;
- ПКБ ЦТ – создание симулятора;
- ОАО «РЖД» в роли координатора проекта.

Обнаружение препятствий осуществляется несколькими способами на основе лидарных данных и данных стереозрения, обрабатываемых в режиме реального времени с помощью нейронных сетей. Одним из основных источников данных являются лидары, выдающие облако точек от лазерного сканирования. В алгоритмах, находящихся в эксплуатации, преимущественно используются классические алгоритмы кластеризации данных. В настоящее время в рамках исследований проверяется эффективность применения нейронных сетей для задачи кластеризации лидарных точек, а также для совместной обработки лидарных данных и данных с видеокамер. Часть испытаний и проверки алгоритмов проводится с использованием железнодорожного симулятора.

По результатам обзора можно сделать вывод о том, что системы обнаружения препятствий на железнодорожных путях могут быть полезны уже сейчас при ведении поезда машинистом в темное время суток и при ограничении обзора погодными условиями. Использование подобных устройств обнаружения может значительно сократить число аварийных ситуаций и их экономические последствия. Системы можно использовать как помощник машинисту, а в будущем как часть автономной системы управления поездом. На основе зарубежного опыта возможно создание собственной системы обнаружения препятствий или разработка общей системы с ближайшими географическими соседями.

УДК 656.25

## **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА FMECA МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ**

*С. Н. ХАРЛАП, В. Л. КАТКОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время на железных дорогах Республики Беларусь и Российской Федерации широко внедряются микроэлектронные системы и устройства железнодорожной автоматики, связанные с обеспечением безопасности движения поездов. В соответствии с требованиями технического регламента Таможенного союза ТР ТС 003/2011 для таких систем разработчик обязан выполнить ряд мероприятий по подтверждению функциональной безопасности, результатом которых является документ «Доказательство безопасности». Основным методом доказательства, рекомендованным стандартами, служит анализ видов, последствий и критичности отказов (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis – FMECA*).

Анализ *FMECA* выполняется в следующем порядке:

- 1) изучение документации, определение критериев опасных отказов;
- 2) определение видов отказов в соответствии с рекомендациями нормативных документов;
- 3) последовательная имитация отказов элементов;
- 4) определение последствий и критичности отказов в соответствии с установленными критериями;
- 5) анализ возможности накопления отказов, влияние отказов по общей причине и множественных отказов.

На первом этапе выполняется анализ технической документации (технических требований, архитектуры, принципиальных схем, функционального описания и др.) Особое внимание уделяется четкой и однозначной формулировке критериев опасных и защитных отказов, методам и критериям обнаружения отказов, а также возможности парирования последствий отказов.

После изучения архитектуры и принципиальных схем определяются виды отказов. Для элементов систем железнодорожной автоматики перечень видов отказов компонентов аппаратных средств определен стандартом СТБ *IEC 62425-2011* «Железные дороги. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Электронные системы сигнализации, связанные с безопасностью», приложение С. Существует возможность исключения некоторых видов отказов из анализа в зависимости от физических свойств компонента или технологии его изготовления. Результатом этого этапа является перечень видов отказов, которые должны учитываться при выполнении анализа *FMECA*.

На следующих этапах для каждого компонента последовательно выполняется имитация всех отказов из перечня видов отказов и определяются последствия и критичность каждого одиночного отказа, а также возможность накопления отказов и влияние отказов по общей причине. Данная процедура может быть выполнена следующими способами:

- экспертной оценкой последствий отказов без выполнения имитации;
- выполнение физического макетирования отказа с помощью специальных коммутирующих устройств, позволяющих имитировать обрывы компонентов размыканием соответствующих цепей, а короткие замыкания компонентов – замыканием определенных узлов на плате;
- внесение отказов в компьютерную имитационную модель устройства.

Каждый из рассмотренных выше способов имеет свои ограничения. Для проведения экспертной оценки последствий отказов без выполнения имитации необходимо привлечение высококвалифицированных экспертов. В этом случае устройство должно быть достаточно простым, чтобы эксперт мог с высокой достоверностью спрогнозировать поведение схемы при отказе. При увеличении сложности схемы достоверность результатов снижается, что требует применения других методов анализа.

Выполнение физического макетирования отказа с помощью специальных коммутирующих устройств обладает высокой достоверностью полученных результатов. Однако такой способ также имеет свои ограничения. Во-первых, это высокие затраты на имитацию отказов, т. к. требуется изготовление специального макета. Во-вторых, большое количество отказов невозможно имитировать с помощью коммутирующих устройств. Поэтому обычно данный способ применяют в том случае, когда другими методами не удастся обеспечить высокую достоверность анализа последствий отказов.

Наиболее эффективным является внесение отказов в компьютерную имитационную модель устройства. Современные пакеты схемотехнического моделирования обладают достаточно высокой достоверностью результатов и возможностью внесения различных отказов. Однако большинство программных средств имеют свои ограничения, например, *PSpice* не имеет возможности моделировать программируемые элементы, *Proteus Design Suite* имеет закрытый формат библиотек элементов, что не позволяет имитировать некоторые отказы.

Все рассмотренные способы предполагают имитацию отказов в ручном режиме, что приводит к тому, что анализ занимает длительное время. Кроме того, при использовании имитационных моделей остается нерешенной проблема влияния «человеческого фактора» на достоверность результатов анализа. Таким образом, можно выделить следующие основные проблемы, с которыми сталкиваются эксперты при выполнении анализа *FMECA*: высокую сложность систем, длительный и рутинный характер выполнения анализа, обуславливающий высокую вероятность ошибок человека. Частично решить эти проблемы можно автоматизацией проведения анализа *FMECA* на базе имитационной модели устройства.

В научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и ЭМС технических средств» разработано программное обеспечение, которое позволяет в автоматизированном режиме получить результаты моделирования электронной схемы при отказе различных элементов. Программа написана на языках *C#* и *Python*. Программа имеет интуитивно-понятный интерфейс, с помощью которого пользователь может загрузить электронную схему и указать, какие виды отказов элементов необходимо моделировать. После запуска процесса моделирования внесение отказов и протоколирование полученных результатов происходит в автоматическом режиме.

К достоинствам разработанной программы следует отнести следующее:

- программное обеспечение базируется на программе *ngSpice*, которая использует для моделирования ядро *SPICE* – общепризнанный эталон в области моделирования электронных схем;
- используется открытое, свободно распространяемое программное обеспечение;
- в разработанном программном продукте есть два способа протоколирования полученных результатов: графический (осциллограммы) и текстовый (уровни напряжений во времени). Такой подход позволяет использовать как ручные методы анализа, так и средства автоматизации обработки результатов моделирования.

В научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и ЭМС технических средств» выполнена апробация программного обеспечения при выполнении научно-исследовательских работ. Результаты автоматизированного моделирования отказов элементов в схеме совпадают с результатами, полученными при ручном внесении отказов в программе *LTspice*.

Применение разработанного программного продукта при проведении экспертизы на функциональную безопасность современных устройств ЖАТ позволит автоматизировать анализ влияния отказов каждого из элементов исследуемой схемы, повысит качество анализа электронных схем, сократит сроки выполнения работ и снизит количество ошибок, связанных с человеческим фактором.

УДК 656.25

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЗОНЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПЕРЕЕЗДА**

С. Н. ХАРЛАП

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В. П. ШИШКОВЕЦ

*Белорусская железная дорога, г. Осиповичи*

Места пересечений автомобильных и железных дороги всегда являлись местами повышенной опасности. Столкновения железнодорожного и автомобильного транспорта приводят к челове-

ским жертвам, повреждениям автомобильного транспорта, подвижного состава, верхнего строения пути, систем СЦБ и электроснабжения, нарушению графика движения поездов. Статистика последних лет говорит о том, что несмотря на принимаемые меры по повышению безопасности переездов количество аварий не уменьшается. Значительное число аварий (более 80 %) приходится на не охраняемые переезды. В связи с этим актуальным является решение задачи своевременного обнаружения препятствий для движения поезда в зоне железнодорожного переезда.

В настоящее время идет активная разработка и внедрение систем автоматического контроля зоны железнодорожного переезда в Германии, Италии, Японии и других странах. Такие фирмы, как *FLIR Intelligent Transportation Systems*, *IDS*, *Schweizer Electronic*, *Hitachi*, *Siemens* уже предлагают готовые технические решения по обнаружению препятствий и контролю зоны переездов. В России разработки в данном направлении ведут ООО «Уралжелдоравтоматизация» и АО «НИИАС». Эти и другие аналогичные системы предполагают два метода регистрации объектов: гравитационный и метод изменения проницаемости пространства.

При использовании гравитационного метода физические и геометрические свойства фиксируемого объекта не имеют никакого значения, для обнаружения важна лишь его масса. Реализация данного способа осуществляется с помощью весовых датчиков. Достоинством гравитационного метода является простота технической реализации, однако широкого распространения данный метод не получил ввиду ряда недостатков. Во-первых, эксплуатация весовых датчиков в зимний период вызывает затруднения по причине возможного образования льда под основанием платформ, устанавливаемых на датчики. Во-вторых, требуется научное обоснование минимального веса постороннего объекта в контролируемой зоне, который должен классифицироваться как препятствие, создающее угрозу безопасности движения.

Способ определения препятствий на переезде по изменению проницаемости пространства в контрольной зоне предполагает, что при отсутствии посторонних объектов на переезде проницаемость для световых лучей, радиоволн и других видов излучений однородна в пределах всего контролируемого пространства. Появление препятствия приведет к полному или частичному поглощению излучения в локальной области, возможно также появление отраженного излучения. В существующих системах автоматического контроля зоны железнодорожного переезда данный способ реализуется с помощью лазерных радаров и видеокамер с системой распознавания объектов или без нее. Лазерные радары получили широкое распространение, ввиду минимальной подверженности влиянию метеорологических осадков, запыленности и загрязненности, возможности определения габаритов объекта и настройки индивидуальных параметров обнаружения. Серьезный недостаток данных датчиков заключается в их невосприимчивости для фиксации объектов, обладающих небольшими размерами, но которые могут повлечь за собой серьезную аварию. Поэтому, лазерные радары редко используются как самостоятельное средство обнаружения объектов и чаще всего работают в комплексе с видеокамерами.

Видеокамеры, в свою очередь, перекрывают недостаток лазерного радара. Однако при использовании видеокамер без системы распознавания объектов встает вопрос об эффективности их использования, так как требуется постоянный контроль видеозображения со стороны человека. Ввиду этого, самым перспективным средством обнаружения препятствий в зоне железнодорожного переезда может стать видеокамера большого разрешения с предварительно обученной нейросетью. В отличие от остальных датчиков ее можно использовать как самостоятельное средство контроля зоны переезда и убрать человека из контура управления автоматикой, что положительно скажется в сторону повышения безопасности. Однако тут тоже есть свои недостатки, такие как дороговизна и сложность программного обеспечения и самой видеокамеры, также стоит вопрос информационной безопасности фирменного программного обеспечения.

Еще одной серьезной проблемой является то, что в нормативных документах отсутствуют требования к препятствию для движения поезда в зоне железнодорожного переезда. По умолчанию предполагается, что препятствием может быть только автомобильное транспортное средство. Поэтому датчики настраиваются на их минимальные габариты или вес. Причем каждый производитель сам выбирает и обосновывает эти значения. Чувствительность датчиков, а следовательно, и их стоимость, в разных системах может отличаться в несколько раз. При этом человек не рассматривается как препятствие, так как в случае столкновения с поездом не может повредить инфраструктуру железнодорожного транспорта. Не рассматриваются как препятствия и различные посторонние

предметы, такие как бревна, трубы, строительный и бытовой мусор и другие предметы, не попадающие в выбранный габарит препятствия.

Ввиду всего вышесказанного, требуется провести исследования в области применения различных технических средств для обнаружения препятствий в зоне железнодорожного переезда и нормирования требований к таким устройствам с учетом зарубежного опыта. Общие направления исследований будут состоять из нескольких этапов.

Первый этап заключается в выборе и объединении датчиков различного спектра действия в единый комплекс технических средств. Также должно быть предусмотрено улучшение характеристик и уменьшение влияния недостатков на безопасность системы в целом. Например, для исключения накопления льда на платформах с нажимными датчиками по периметру установить типовые электрические обогреватели, применяемые на сети железных дорог для обогрева стрелочных переводов. Оптимальный подбор и модернизация средств обнаружения препятствий позволит компенсировать их собственные недостатки, а также повысить достоверность информации, получаемой системой.

На втором этапе исследования будут ориентированы на реализацию таких алгоритмов, которые на основании информации, полученной с датчиков различного типа, позволили бы гарантированно идентифицировать объекты, которые могут представлять опасность.

Третий этап будет направлен на создание аппарата прогнозирования по принятию решений при наличии препятствий в зоне переезда. Система будет анализировать тип, габариты, динамические характеристики (направление и скорость движения) и другие параметры обнаруженного объекта и с помощью специального алгоритма решать, представляет объект угрозу для движения поезда в зоне железнодорожного переезда или нет. Сведения, полученные после прогнозирования обстановки на переезде, будут обрабатываться, и в виде удобной для восприятия информации, отправляться по радиоканалу дежурному и в кабину машинисту.

Четвертый этап будет сфокусирован на разработке системы раннего оповещения машиниста с использованием нескольких степеней предупреждения. Данная система необходима ввиду большого числа возможных ситуаций на переезде. Так как в современных системах чаще всего используется заградительная сигнализация, имеющая лишь две степени предупреждения, способ многовариантной подачи информации позволит увеличить пропускную способность транспорта через переезды и значительно уменьшить число ложных срабатываний с использованием экстренного торможения.

Пятый этап представляет собой опытную эксплуатацию разработанной системы.

В настоящее время начаты работы по первому этапу. Внедрение системы автоматического контроля зоны железнодорожного переезда значительно повысит безопасность движения автомобильного транспорта и пешеходов, особенно на неохраняемых переездах, уменьшит общее число аварийных ситуаций, и, следовательно, позволит снизить уровень социально-экономического ущерба.

УДК 656.25

## **МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ПРОТОКОЛ ОБМЕНА ДАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С ПЕРСОНАЛЬНЫМ КОМПЬЮТЕРОМ**

*С. И. ХОМЕНКО, В. А. ЗАЛЕСОВСКИЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

При разработке измерительной системы, состоящей из персонального компьютера и измерительного модуля, связанных через последовательный интерфейс передача данных, большое внимание следует уделить протоколу обмена информацией. Существующие, реализованные и предлагаемые в открытом доступе протоколы обмена данными (например, Firmata) требуют больших аппаратных и программных ресурсов и их функции в большинстве своем избыточны. Поэтому при построении измерительной системы ставилась задача реализовать библиотеки простейших классов для персонального компьютера и измерительного устройства, реализующие необходимые функции протокола обмена данными.

Также, учитывая подверженность канала измерения внешним помехам, были проанализированы методы фильтрации значений, такие как среднее арифметическое, бегущее среднее, медианный фильтр, альфа-бета фильтр, упрощенный фильтр Калмана, линейная аппроксимация. Среди представленных фильтров был выбран медианный фильтр, по причине простоты реализации и лучшей возможности отсеивания выбросов неверных результатов измерения.

Медианный фильтр пропускает среднее значение из множества значений. Размер этого множества нечётный, чтобы избежать двусмысленности при выборе среднего значения. Основная идея следующая: имеется буфер с несколькими значениями, из которых выбирается медиана, то есть такое значение, что половина из элементов выборки больше него, а другая половина меньше. На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма выборки среднего (mid) для трех множеств (A, B, C).

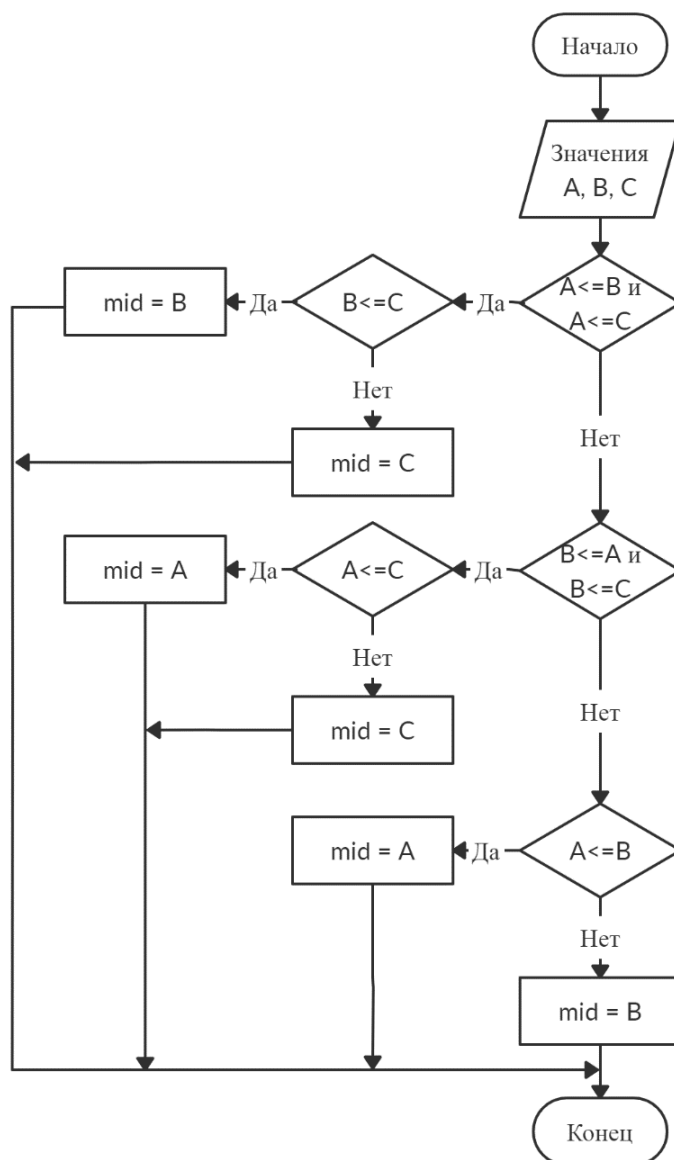


Рисунок 1 – Блок-схема медианного фильтра

Для формирования измерительной системы устройство подключается к персональному компьютеру через comport и управляется оператором через программный интерфейс.

При отправке команды или измеренной информации по последовательному интерфейсу формируется пакет данных, который передается устройству. Устройство, после приема пакета, проверяет целостность сообщения по стартовому, стоповому битам и контрольной сумме CRC. Далее выполняется команда на измерение и формируется пакет с результатом измерения, который отправляется на персональный компьютер. На рисунке 2 представлена структура передаваемого пакета данных.

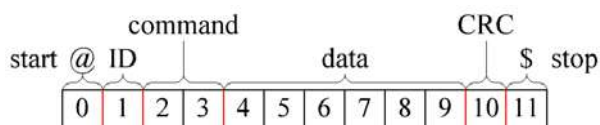


Рисунок 2 – Структура пакета данных

Передаваемый пакет имеет следующую структуру:

0, 11 – символы начала и конца пакета, необходимые для разграничения пакетов данных между собой;

1 – ID устройства;

2, 3 – код выполняемой команды;

4–9 – измеренные данные;

10 – контрольная сумма.

Алгоритм контрольного суммирования CRC расшифровывается, как циклический избыточный код (Cyclic Redundancy Code), и предназначается для контроля целостности данных и основывается на свойствах деления с остатком многочлена на многочлен. Результатом контрольного суммирования CRC является остаток от деления многочлена, соответствующего исходным данным, на порождающий многочлен фиксированной длины. В зависимости от вида порождающего многочлена и его длины, изменяется вероятность совпадения контрольных сумм для различных исходных данных и время контрольного суммирования. Существует достаточно большое разнообразие порождающих многочленов для алгоритмов контрольного суммирования CRC – 8, 16 и 32, подобранных на основе теории кодирования и многочисленных исследований. Любому полиному можно однозначно сопоставить бинарную последовательность.

Если полином в общем виде записывается, как

$$A_1 \cdot 2^n + A_2 \cdot 2^{n-1} + \dots + A_{n-1} \cdot 2^1 + A_n,$$

где  $A_1 \dots A_n$  – коэффициенты, принимающие значения единицы или нуля. Тогда достаточно записать последовательность из коэффициентов  $A_1 \dots A_n$ , чтобы однозначно задать полином. Например, полином  $2^4 + 2^2 + 1$  однозначно соответствует бинарной последовательности 10101, так как  $1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 = 2^4 + 2^2 + 1$ . Пример одного из порождающих многочленов CRC-8 =  $2^8 + 2^7 + 2^6 + 2^4 + 2^2 + 1$ , 11101011 в бинарном виде. Так как деление можно заменить повторением операций вычитания, то в полиномиальной арифметике выполняется вычитание по модулю 2 (рисунок 3).

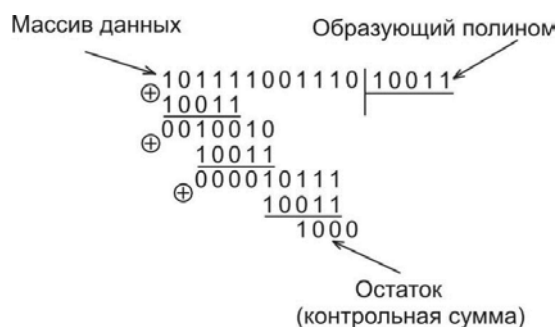


Рисунок 3 – Вычисление контрольной суммы

Таким образом, реализованные классы медианного фильтра и защищенного протокола обмена информацией позволяют осуществлять накопления массива измеренных данных, его обработку и отправку выделенного значения по последовательному интерфейсу персонального компьютера (USB) с минимальным использованием программных и аппаратных ресурсов микроконтроллера.

УДК 656.25

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

*С. И. ХОМЕНКО, Д. Д. МЕДВЕДЕВ, В. А. ЗАЛЕСОВСКИЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Актуальность темы обусловлена тем, что при расчете рельсовой цепи необходимо обладать параметрами четырехполосников, входящих в состав рельсовой цепи. Так как информация о параметрах четырехполосников не является общедоступной, был разработан микропроцессорный измеритель параметров четырехполосников, который позволит экспериментальным путем получить комплексные коэффициенты четырехполосников.



Если схема четырехполюсника неизвестна, то его параметры можно определить экспериментальным путем, используя известный метод холостого хода и короткого замыкания.

Для определения А-параметров четырехполюсника необходимо на его входе подключить вольтметр (V), амперметр (A) и фазометр (φ), как показано на рисунке 1.

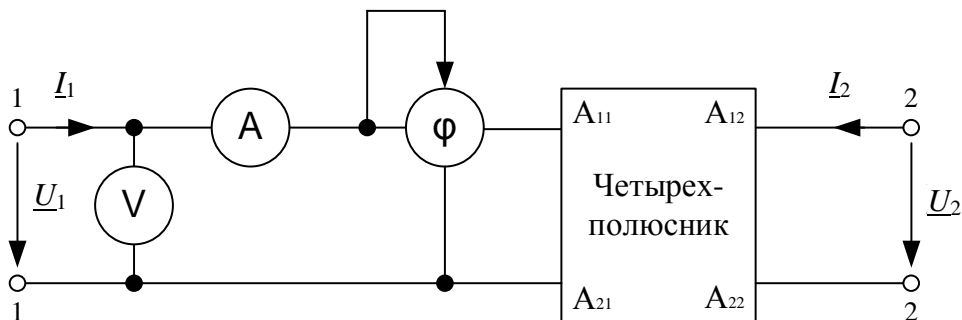


Рисунок 1 – Схема для экспериментального определения параметров четырехполюсника

Переведем четырехполюсник в режим холостого хода по выходу ( $I_2 = 0$ ) и измерим с помощью приборов напряжение ( $U_{x.x.1}$ ), ток ( $I_{x.x.1}$ ) и фазу ( $\varphi_{x.x.1}$ ).

В случае, когда  $I_2 = 0$  система А-параметров имеет вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}_{11} \cdot \underline{U}_2, \\ \underline{I}_1 &= \underline{A}_{21} \cdot \underline{U}_2. \end{aligned} \quad (1)$$

Из формулы (1) получим

$$\underline{Z}_{x.x.1} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{21}}. \quad (2)$$

Переведем четырехполюсник в режим короткого замыкания по выходу ( $U_2 = 0$ ). Измерим ток ( $I_{к.з.1}$ ), напряжение ( $U_{к.з.1}$ ) и фазу ( $\varphi_{к.з.1}$ ), тогда система А-параметров будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A}_{12} \cdot \underline{I}_2, \\ \underline{I}_1 &= \underline{A}_{22} \cdot \underline{I}_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Из формулы (3) получим

$$\underline{Z}_{к.з.1} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22}}. \quad (4)$$

Подключим приборы к зажимам (2-2) и переведем четырехполюсник в режим холостого хода по входу ( $I_1 = 0$ ) и измерим ток ( $I_{x.x.2}$ ), напряжение ( $U_{x.x.2}$ ) и фазу ( $\varphi_{x.x.2}$ ). Тогда имеем:

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= \underline{A}_{22} \cdot \underline{U}_1, \\ \underline{I}_2 &= \underline{A}_{21} \cdot \underline{U}_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Из формулы (5) получим

$$\underline{Z}_{x.x.2} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{21}}. \quad (6)$$

Четвертое уравнение получим, используя соотношение:

$$\underline{A}_{11} \cdot \underline{A}_{22} - \underline{A}_{12} \cdot \underline{A}_{21} = 1. \quad (7)$$

Решив систему уравнений (2), (4), (6) и (7), найдем А-параметры четырехполюсника:

$$\underline{A}_{22} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{x.x.2}}{\underline{Z}_{x.x.1} - \underline{Z}_{к.з.1}}}; \underline{A}_{12} = \underline{A}_{22} \cdot \underline{Z}_{к.з.1}; \underline{A}_{21} = \frac{\underline{A}_{22}}{\underline{Z}_{x.x.2}}; \underline{A}_{11} = \underline{A}_{22} \cdot \frac{\underline{Z}_{x.x.1}}{\underline{Z}_{x.x.2}}.$$

Указанная методика измерения реализована в разработанной структурной схеме микропроцессорного измерителя, представленной на рисунке 2.

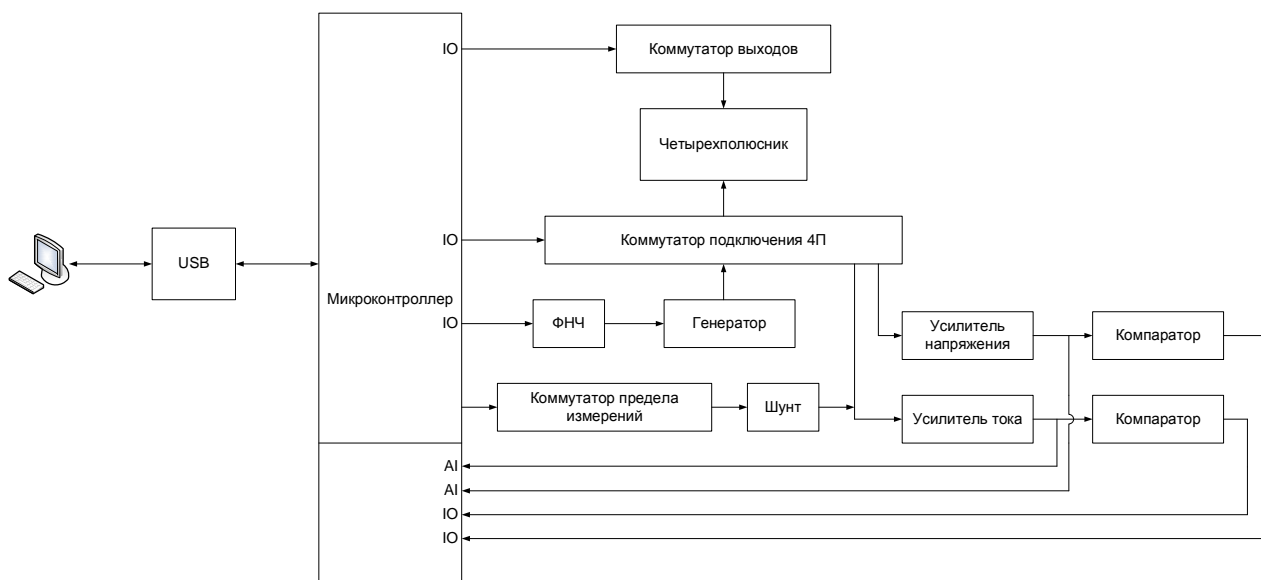


Рисунок 2 – Структурная схема микропроцессорного измерителя параметров четырехполюсников

Прибор состоит из блока коммутации, генератора синусоидального сигнала, схемы измерения тока, напряжения и фазы и микроконтроллера, связанного интерфейсом USB с персональным компьютером.

Персональный компьютер связан с микроконтроллером посредством интерфейса Universal Serial Bus (USB). Микроконтроллер выполняет функции управления процессами коммутации, коммутации пределов измерения значений тока, генерацией синусоидального сигнала, измерением напряжения и тока при помощи встроенного аналого-цифрового преобразователя. Обработка измеренных данных осуществляется на персональном компьютере.

Блок коммутации подключения четырехполюсника осуществляет коммутирование входа и выхода четырехполюсника к генератору и измерительной схеме.

Блок коммутации выходов обеспечивает выполнение режима холостого хода и короткого замыкания.

Генерация синусоидального сигнала производится с помощью его формирования программными методами широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Параметры сигнала задаются путем посылки команды с персонального компьютера.

Для измерения тока и напряжения осуществляется измерение амплитудного значения синусоидального сигнала, а устройство выделения фронта вычисляет фазу между током и напряжением проходящего через четырехполюсник.

Таким образом разработанный измеритель позволит определить параметры любого четырехполюсника, входящего в рельсовую цепь, а также позволяет проверить правильность составления регулировочной таблицы путем измерения напряжений в начале и конце рельсовой линии.

УДК 656.25

## ВОПРОСЫ НОРМИРОВАНИЯ УРОВНЯ ПОМЕХ ОТ ТЯГОВОГО ТОКА НА АППАРАТУРУ АВТОМАТИКИ

*В. И. ШАМАНОВ*

*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Рельсовые цепи (РЦ) остаются в развитых странах основным средством контроля свободности участков железнодорожного пути и передачи этой информации на локомотив [1]. Сбои в их работе и в работе аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) ухудшают безопасность движения поездов и снижают пропускную способность участков пути.

По сравнению с участками с автономной тягой при электротяге переменного тока количество сбоев в работе локомотивной аппаратуры АЛС происходит больше в 60–70 раз, а при электротяге постоянного тока больше в 40–50 раз. Одной из основных причин такого увеличения количества сбоев является мешающее влияние асимметрии тягового тока в рельсах в местах подключения к ним аппаратуры РЦ и под приемными локомотивными катушками АЛС. Поэтому вопрос о нормировании величины этой асимметрии весьма актуален [2].

Считается, что асимметрия тягового тока, т. е. разность тяговых токов в первой  $I_{T1}$  и во второй  $I_{T2}$  рельсовых нитях рельсовой линии, для переменного тягового тока не должна превышать 15 А. Однако это значение было получено экспериментально для дроссель-трансформаторов (ДТ) типа ДТ-1-150, чтобы исключить чрезмерное подмагничивание их сердечников токами асимметрии. Также получено предельное значение асимметрии тягового тока для ДТ, предназначенных для участков с электротягой постоянного тока. Следовательно, эти нормы, строго говоря, не относятся к нормированию уровней помех от тягового тока на аппаратуру автоматики и телемеханики. А норма асимметрии переменного тягового тока в 12 А, предложенная ПКТБ ЦШ, конечно, никак не обоснована.

Эквивалентную схему замещения для двухниточной неразветвленной РЦ, ограниченной с обоих концов изолирующими стыками с ДТ, можно представить в виде, показанном на рисунке 1.

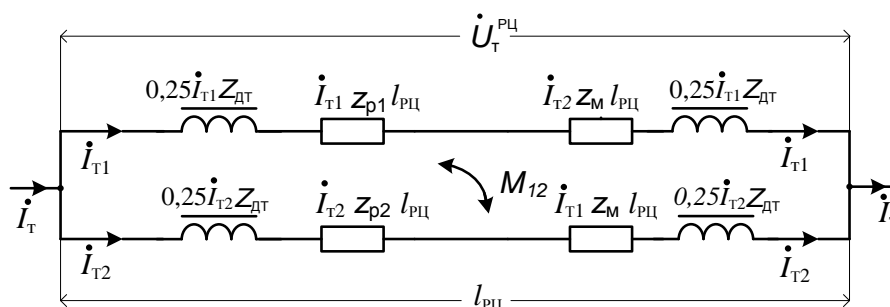


Рисунок 1

Тяговый ток  $I_T$  растекается в такой схеме по первой  $I_{T1}$  и второй  $I_{T2}$  рельсовым нитям рельсовой линии обратно пропорционально их сопротивлениям. Сопротивления эти состоят из сопротивления основных обмоток ДТ  $Z_{DT}$ ; сопротивлений взаимной индуктивности  $M_{12}$  рельсовых нитей с удельным значением  $z_M = j\omega M_{12}$ , а также из удельных сопротивлений отрезков рельсовых линий  $z_{p1}$  и  $z_{p2}$ , продольные сопротивления которых включают в себя сопротивления сплошных рельсов, сопротивления стыков между рельсовыми звеньями и сопротивления дроссельных перемычек.

Уравнения для оценки распределения падений тягового напряжения по элементам первой и второй рельсовых нитей данной схемы можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_T^{PC} &= \dot{I}_{T1} z_{p1} l_{PC} + \dot{I}_{T2} z_{M1} l_{PC} + 0,5 \dot{I}_{T1} Z_{DT}; \\ \dot{U}_T^{PC} &= \dot{I}_{T2} z_{p2} l_{PC} + \dot{I}_{T1} z_{M2} l_{PC} + 0,5 \dot{I}_{T2} Z_{DT}. \end{aligned}$$

Эквивалентная схема замещения такой РЦ в режиме АЛС будет отличаться тем, что головной электровоз своими колёсными парами закорачивает секции основной обмотки ДТ, показанные на рисунке слева, а сопротивления  $z_{p1}$  и  $z_{p2}$ , становятся функциями расстояния от головы электровоза до конца РЦ.

Сложность анализа процесса растекания тяговых токов  $I_{T1}$  и  $I_{T2}$  по рельсовым нитям рельсовой линии определяется следующим. Сопротивления рельсов  $z_{p1}$  и  $z_{p2}$  зависят от величины тягового тока в них, от частоты гармоники тягового тока, а в неоднородных рельсовых линиях ещё и от характера распределения продольного и поперечного сопротивления рельсовой линии по длине РЦ  $l_{PC}$ . Переменный тяговый ток активно стекает из рельсов в землю, поэтому величина тягового тока в рельсовых нитях меняется по длине рельсовой линии. Гармонический состав тягового тока изменяется во времени и по длине рельсовых линий. Взаимная индуктивность рельсовых нитей  $M_{12}$

увеличивает асимметрию тягового тока, а величина сопротивлений взаимной индуктивности  $z_{M1}$  и  $z_{M2}$  зависит от быстро изменяющихся амплитуд и частотного спектра тягового тока, протекающего не только по собственной рельсовой линии, но и по соседним линиям тяговой сети [4].

Количество сбоев в работе локомотивной аппаратуры АЛС может на два порядка больше, чем в РЦ. Вызвано это тем, что в РЦ с ДТ секции их основных обмоток играют роль балластных сопротивлений, а при индуктивной передаче сигналов из рельсов на локомотив происходит своеобразное усиление уровней гармоник тягового тока по мере роста их частоты. На локомотивную аппаратуру АЛС мешающее влияние оказывают также токи, растекающиеся по их металлическим частям [3]. Поэтому уровни помех от тягового тока на путевые приёмники РЦ и на локомотивные приёмники АЛС различны. При нормировании необходимо также учитывать помехоустойчивость рассматриваемой аппаратуры.

Наибольший уровень помех тяговый ток оказывает на аппаратуру РЦ, устанавливаемую на входном для этого тока конце. Данный конец является чаще всего и входным для поезда. Поэтому первой мыслью является выбор этой точки за критическую по величине асимметрии тягового тока в рельсовой линии. Однако это справедливо только для однородных рельсовых линий.

Нормировать асимметрию тягового тока в рельсовых линиях необходимо, конечно, по величине отношения «сигнал – помеха» на входе соответствующей аппаратуры автоматики. В неоднородных рельсовых линиях величины и асимметрии тягового тока, и сигнального тока изменяются по их длине, что вызывает также изменение рассматриваемого соотношения. Поэтому для разработки методики нормирования нужно создать методику расчета изменения по длине неоднородной рельсовой линии величин данных токов. Следовательно, простое нормирование величины асимметрии тягового тока в рельсовых линиях по требованиям, предъявляемым к дроссель-трансформаторам, некорректно, что и вызывает необходимость разработки достаточно строгой методики нормирования рассматриваемой асимметрии.

#### Список литературы

- 1 Railway Operation and Control. – 3rd edition. – Washington : VTD Rail Publishing, Mountlake Terrace. – 2014. – 284 p.
- 2 Бочков, К. А. Исследование электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К. А. Бочков. – Л. : ЛИИЖТ, 1981. – 19 с.
- 3 Шаманов, В. И. Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов. – М. : ГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2013. – 244 с.
- 4 Shamanov, V. I. Magnetic properties of rails and the noise level in the hardware of railway automation and remote control / V. I. Shamanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86, no. 8. – P. 509–512.

УДК 656.25

## КОНТРОЛЬ ПОПЕРЕЧНОЙ АСИММЕТРИИ СОПРОТИВЛЕНИЙ РЕЛЬСОВЫХ НИТЕЙ

*В. И. ШАМАНОВ, Д. В. ДЕНЕЖКИН*

*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Одной из основных причин сбоев в работе рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации на участках с электротягой переменного тока является асимметрия тягового тока в рельсах в местах подключения к ним аппаратуры и под приемными локомотивными катушками, вызываемая продольной или поперечной асимметрией сопротивления рельсовой линии. Поперечная асимметрия появляется при уменьшении входных сопротивлений цепей заземления опор контактной сети и различных конструкций, подключаемых к рельсам, а также при одностороннем ухудшении состояния электрической изоляции железобетонных шпал [1, 2].

Цепи заземления и рельсы при невысоких напряжениях электрически разделяют искровыми промежутками, которые не оборудуются устройствами телеконтроля и поэтому могут находиться в пробитом состоянии неопределенно долго. Входного контроля исправности искровых промежутков, приходящих с заводов, нет, поэтому пробитые искровые промежутки могут заменяться неисправными новыми. Электрическое сопротивление рельсов по отношению к железобетонным шпалам уменьшается в процессе эксплуатации из-за продавливания или загрязнения токопроводящими материалами электроизолирующих элементов шпал.

Степень мешающего влияния тягового тока в рельсовых линиях на аппаратуру оценивают коэффициентом его асимметрии, вычисляемым как отношение разности тяговых токов в рельсовых нитях к их сумме. Считается, что величина коэффициента асимметрии переменного тягового тока не должна превышать 5 %.

На рисунке 1 показано, как изменяется этот коэффициент по длине перегона длиной 1,2 км на участке с электротягой переменного тока, когда на перегоне оказываются пробитыми искровые промежутки в цепях заземления на рельсы у двух подряд опор контактной сети. Сопротивление изоляции рельсовых нитей по отношению к земле равно 0,5 Ом·км.

Кривая 1 показывает, как изменяется данный коэффициент при исправных искровых промежутках с сопротивлением по 100 Ом, а кривая 2 – когда сопротивления цепей заземления двух пробитых искровых промежутков составляют по 10 Ом.

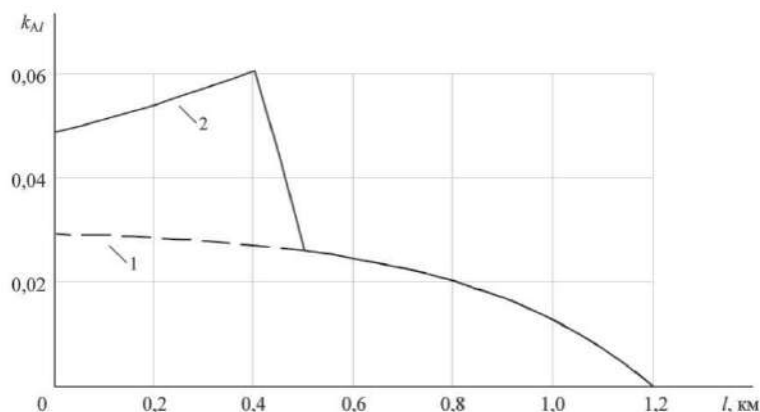


Рисунок 1

В такой ситуации при проезде поезда мимо опор контактной сети с пробитыми искровыми промежутками в цепях их заземления на рельсы будет происходить сбой в работе аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации. Подобная ситуация возникает и при одностороннем пробое изоляции железобетонных шпал.

Искровые промежутки, по сути, отделяют рельсы от высоковольтной контактной сети. В результате все работы по ручному контролю состояния рассматриваемых цепей заземления должны проводиться с выполнением всех требований к работам в высоковольтных сетях. Поэтому данные работы относительно сложны и отличаются большой трудоемкостью [3]. Трудоемки и требуют высокой квалификации работы по диагностике состояния электрической изоляции железобетонных шпал [2]. Этим определяется необходимость совершенствования способов выполнения данных работ.

В запатентованном способе диагностики состояния цепей заземления на рельсы опор контактной сети [4] использован способ двух вольтметров, разработанный в 80-х годах прошлого столетия [2]. При его использовании для рассматриваемой цели измеряют падения напряжения  $\dot{U}_1$  на отрезке рельса фиксированной длины  $l_0$  в рельсовой нити, к которой цепи заземления не подключаются, а затем напряжения  $\dot{U}_2$  и  $\dot{U}_3$  на отрезках рельсов такой же длины по разные стороны от места подключения цепи заземления к рельсовой линии. Токи в рельсах в местах проведения измерений соответственно

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 / z_p; \quad \dot{I}_2 = \dot{U}_2 / z_p; \quad \dot{I}_3 = \dot{U}_3 / z_p, \quad (1)$$

где  $z_p$  – удельное сопротивление рельсов.

Отсюда коэффициенты асимметрии тягового тока в рельсовой линии по разные стороны места подключения к рельсу цепи заземления опоры контактной сети или другой конструкции

$$k_{A1} = \frac{\dot{I}_1 - \dot{I}_2}{\dot{I}_1 + \dot{I}_2} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{U}_1 + \dot{U}_2}; \quad k_{A2} = \frac{\dot{I}_1 - \dot{I}_3}{\dot{I}_1 + \dot{I}_3} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_3}{\dot{U}_1 + \dot{U}_3}. \quad (2)$$

Найденные значения коэффициента асимметрии тягового тока позволяют определить, насколько цепь подключения к рельсу цепи заземления опоры контактной сети или другой конструкции влияет на устойчивость работы аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации при следовании поезда по ней или аппаратуры рельсовой цепи. Разность коэффициентов асимметрии тягового тока до и после рассматриваемого места подключения

$$\Delta k_{A1} = k_{A1} - k_{A2} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{U}_1 + \dot{U}_2} - \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_3}{\dot{U}_1 + \dot{U}_3}. \quad (3)$$

Применение данного способа обеспечивает возможность проведением простых измерений в низковольтных электрических цепях с последующими простейшими вычислениями устанавливать состояние подключаемых к рельсам рассматриваемых цепей заземления и определять степень влияния неисправностей в них на устойчивость работы аппаратуры автоматической локомотивной сигнализации и рельсовых цепей.

#### Список литературы

- 1 **Брылеев, А. М.** Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. А. Шишляков. – М. : Транспорт, 1978. – 344 с.
- 2 **Шаманов, В. И.** Электромагнитная совместимость систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов. – М. : ГОУ «УМЦ по образованию на ж.-д. транспорте», 2013. – 244 с.
- 3 Технологические карты на работы по содержанию и ремонту устройств контактной сети электрифицированных железных дорог. Кн. II : Техническое обслуживание и текущий ремонт. – М. : Трансиздат, 1999. – 427 с.
- 4 **Шаманов, В. И.** Способ диагностики состояния цепей заземления на рельсы опор контактной сети / В. И. Шаманов, А. Е. Ваньшин, В. С. Кузьмин. – Патент на изобретение № 2671590 РФ; опубл. 02.11.2018; бюл. № 31. – 6 с.: ил.

УДК 621.396: 656.254

### АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЙ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

*В. Г. ШЕВЧУК, С. В. КИСЕЛЕВА*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*С. Н. ЗЮЛЕВА, В. Ю. АСКЕРКО*

*Белорусская железная дорога, г. Гомель*

Надёжную и безотказную работу кабелей связи следует рассматривать как один из важнейших элементов функционирования железной дороги, непосредственно влияющий на безопасность движения поездов, производительность труда работников различных служб, оперативность, достоверность и надёжность передачи данных автоматизированных систем управления железнодорожным транспортом.

Анализ повреждений кабелей связи за 2015–2019 гг. показал, что они с течением времени распределяются равномерно, а видами повреждений кабелей связи на Белорусской железной дороге являются: порыв кабеля (техникой или грызунами), хищение кабеля, попадание грозового разряда, понижение изоляции кабеля, отказ кабеля вследствие горения торфяника (рисунок 1).

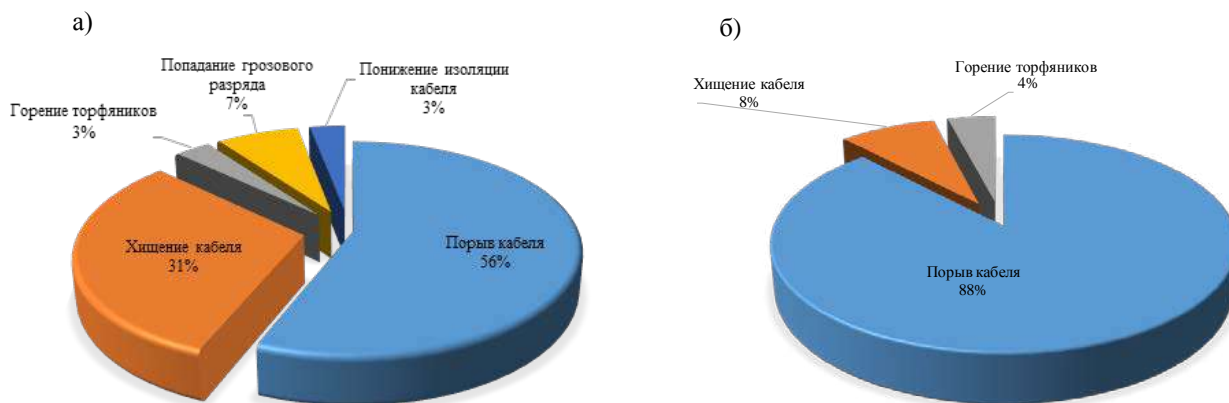


Рисунок 1 – Процентное соотношение причин повреждений кабелей с металлическими жилами (а) и волоконно-оптических кабелей (б) на железной дороге

Для сравнения были проанализированы за тот же период времени и причины повреждений кабелей связи на городской сети Гомельского филиала РУП «Белтелеком» (рисунок 2).

Большинство повреждений городской кабельной сети ГФ РУП «Белтелеком» происходит из-за порывов кабелей землероечной техникой и обусловлено тем, что на территории города Гомеля работает большое число организаций, имеющих свои подземные коммуникации; организаций, отве-

чающих за благоустройство города; частных строительных организаций. Также нередко сами домовладельцы на своей территории по ряду тех или иных причин наносят вред кабельным коммуникациям [1, 2]. Порывы кабелей связи из-за физического износа их, а также соединительных муфт и тройников – это проблема ШЧ, т. к. магистральные линии и большая часть местных линий связи эксплуатируется около 30 лет [3], а кабельные линии РУП «Белтелеком» своевременно обновляются и модернизируются исходя из современных потребностей общества в пользовании услуг Интернет.

Комплексная оценка качества содержания и эксплуатации кабелей связи на железной дороге показала, что они работают с достаточной степенью надежности, что говорит о высокой квалификации обслуживающего персонала. Техническое обслуживание кабелей связи с металлическими жилами и волоконно-оптических кабелей (ВОК) производится на должном уровне. Один из основных критериев оценки качества содержания и эксплуатации кабелей связи, такой как измерение характеристик кабеля, показал, что как у кабелей с металлическими жилами, так и у ВОК основные параметры с течением времени остаются в пределах допустимых норм. Надежная работа железнодорожных кабелей связи позволяет обеспечивать безопасность движения поездов и высокую эффективность управления и контроля транспортных технологических процессов. Для организации качественного технического обслуживания кабелей связи на железной дороге разработаны и внедрены необходимые технические нормативно-правовые акты.

Анализ повреждений кабелей связи за 2015–2019 гг. показал, что основным видом повреждений железнодорожных кабелей связи является порыв. Значения коэффициента готовности, отражающего вероятность того, что кабели связи окажутся в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, рассчитанные исходя из количества повреждений и времени восстановления поврежденного кабеля, показывают, что кабели связи Белорусской железной дороги работают с достаточной степенью надежности.

Особое внимание в последние годы на железной дороге уделяется ВОК: ведется прокладка ВОК на участках железной дороги и в железнодорожных узлах; используются новейшие разработки для более качественного содержания и обслуживания ВОК, в частности, система автоматического мониторинга волоконно-оптических кабелей (САМ-ВОК), которая предназначена для централизованного документирования и контроля сетевого кабельного хозяйства с возможностью прогнозирования и минимизации времени устранения неисправностей, возникающих в волоконно-оптических линиях связи.

Работниками дистанций сигнализации и связи ведётся охранно-разъяснительная работа по сохранности линейно-кабельных сооружений связи.

Учитывая тот факт, что основным видом повреждения кабелей связи является порыв, для улучшения качества содержания и эксплуатации кабелей связи на железной дороге необходимо использовать ленту защитно-сигнальную (ЛЗС) для кабелей, проложенных в грунте [4], и поверхностную маркировку лотковой кабельной канализации. Данные предложения сократят количества порывов кабеля, тем самым вырастет надёжность эксплуатируемых кабелей связи, что приведёт к повышению безопасности движения поездов.



Рисунок 2 – Процентное соотношение причин повреждений кабелей связи городской сети

#### Список литературы

- 1 Аскерко, В. Ю. Исследование надежности кабельных сетей телефонной связи областного центра / В. Ю. Аскерко, В. Г. Шевчук, С. Н. Зюлева // Современные средства связи : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БГАС, 2020.
- 2 Шевчук, В. Г. Исследование надежности кабельных устройств сети телефонной связи областного центра / В. Г. Шевчук, С. Н. Зюлева // Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем : сб. статей X Междунар. науч.-практ. конф. – Казань : Аэтерна, 2017. – С. 128–131.
- 3 Шевчук, В. Г. Анализ отказов устройств проводной связи на железной дороге / В. Г. Шевчук, С. Н. Зюлева // Современные средства связи : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БГАС, 2017. – С. 36–37.
- 4 О механических нагрузках, выдерживаемых ЛЗС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zazemlenie.by/lenta-zaschitno-signalnaya/mekhanicheskie-nagruzki/>. – Дата обращения: 15.09.2020.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ШУМА ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ЕГО СПЕКТРА НА СИГНАЛ НЧ-ТРАКТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ РАДИОСТАНЦИИ

*В. Г. ШЕВЧУК, А. Ю. КУЛАЖЕНКО*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*А. И. ТИТОВ*

*Белорусская железная дорога, г. Гомель*

Рассмотрим математическую модель шума, в которой имеется частота первой гармоники шума и гармоники, кратные этой частоте, причем амплитуда каждой гармоники является случайной величиной. Частоту первой гармоники шума примем равной  $f_{ш1} = 25$  Гц. Период повторения функции шума зависит от частоты первой гармоники и равен  $T_{ш} = 1/f_{ш1}$ .

В интервале моделирования  $T_{мод}$ , меньше периода  $T_{ш} = 0,004$  с, функцию зависимости уровня шума от времени можно считать случайной и непериодической. Гармоника шума с номером  $N$  соответствует частоте  $f_{шN} = f_{ш1} \cdot N$ . Если принять количество рассматриваемых гармоник  $N = 500$ , то последняя рассматриваемая гармоника шума соответствует частоте  $f_{ш500} = 25 \cdot 500 = 12500$  Гц.

Такой выбор диапазона учитываемых частот помех обусловлен амплитудно-частотными характеристиками железнодорожных радиостанций. В НЧ-тракте радиостанций частоты выше 3400 Гц подавляются с помощью активных фильтров. Соотношение между уровнем полезного сигнала и уровнем гармоник шумов частотой выше 10 кГц, как видно из амплитудно-частотных характеристик, например радиостанции РК-1Б, составляет более 60 дБ (более 1000 раз) и с повышением частоты только увеличивается. Поэтому при анализе спектр шума можно ограничить частотой  $f_{ш500} = 12500$  Гц. В рассматриваемой модели амплитуда каждой гармоники шума является случайной величиной, подчиняющейся нормальному закону распределения.

Компьютерная программа MathCAD имеет встроенное средство генерации случайных чисел, подчиняющихся нормальному закону распределения, которое принимает параметры и возвращает массив случайных чисел, подчиняющихся заданным параметрам

$$U_b = rnorm(N, M, \sigma),$$

где  $N$  – количество возвращаемых случайных чисел,  $M$  – математическое ожидание случайной величины,  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение случайной величины.

Математическое ожидание уровня шума  $M = 0$ , среднеквадратичное отклонение амплитуды  $i$ -й гармоники примем равным  $\sigma = 0,025$ , количество возвращаемых случайных значений  $N = 500$ .

График зависимости амплитуд гармоник шума от номера гармоники приведен на рисунке 1, а. График спектра шума  $U_{шp}(t)$  в нулевой момент времени  $t = 0$  – на рисунке 1, б.

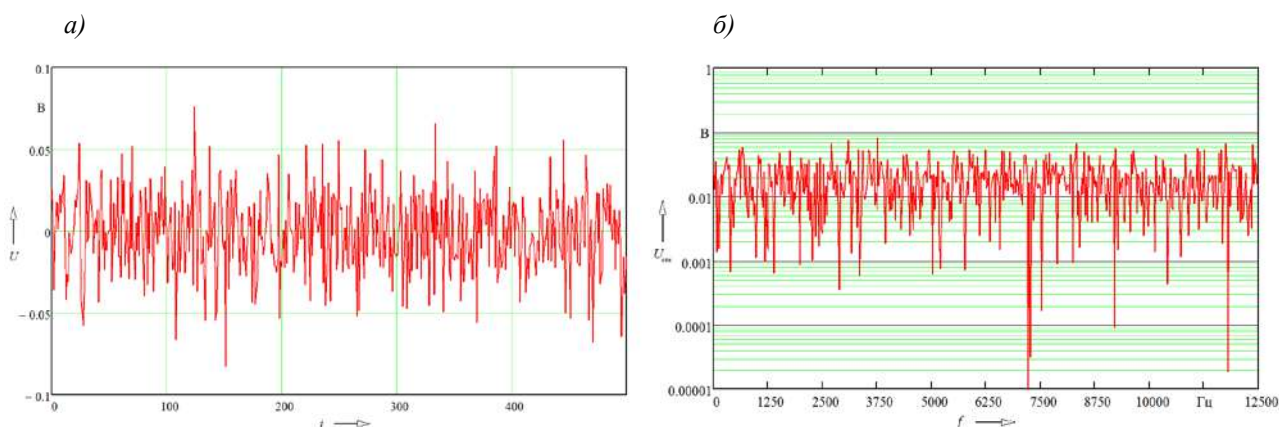


Рисунок 1 – Зависимость амплитуд гармоник шума от номера гармоники (а) и график спектра шума (б)



На рисунке 2, *а* дан график зависимости результирующей амплитуды шума от времени  $U_{шр}(t)$ , а на рисунке 2, *б* – график изменения результирующего напряжения сигнала при наличии шума от времени  $U_{рез}(t)$ .

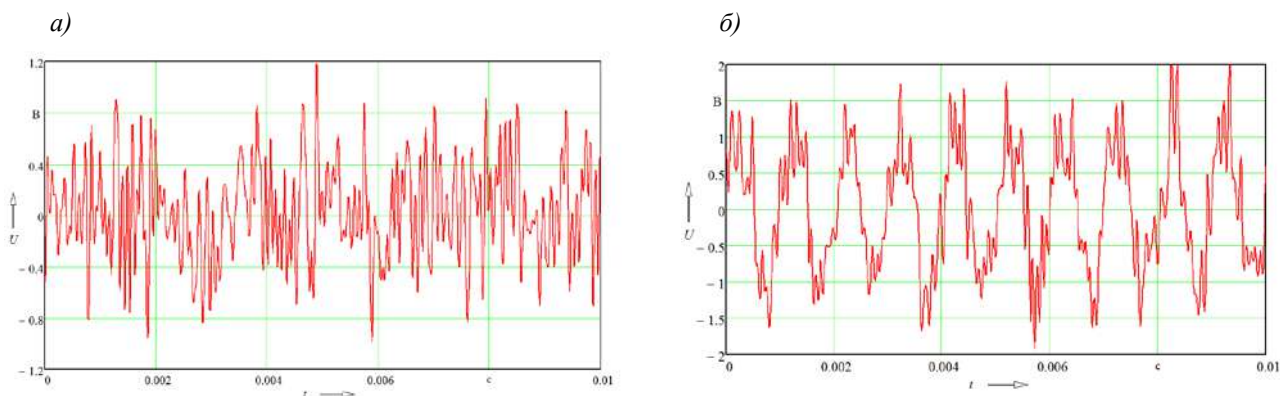


Рисунок 2 – Результирующая амплитуда шума (*а*) и изменение результирующего напряжения сигнала при наличии шума (*б*)

На рисунке 3, *а* приведен спектр сигнала с шумом в диапазоне частот от 0 до 20000 Гц, на рисунке 3, *б* – график сигнала с шумом, ограниченным по спектру до диапазона частот 300–3400 Гц в зависимости от времени.

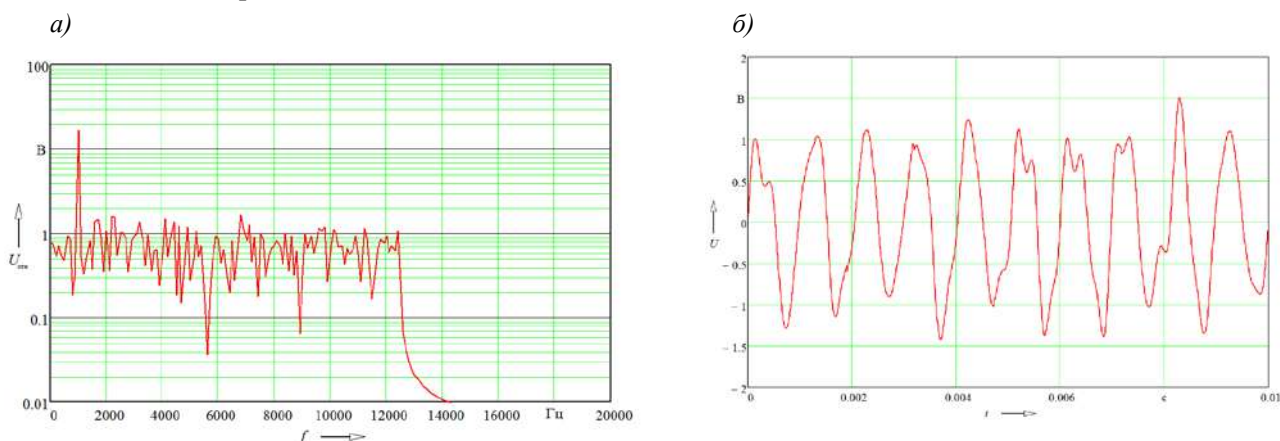


Рисунок 3 – Графики спектра сигнала с шумом в диапазоне частот 0–20000 Гц (*а*) и результирующего напряжения сигнала при наличии шума, ограниченного по спектру до диапазона частот 300–3400 Гц (*б*)

Результаты расчетов параметров модели шума с ограничением по спектру приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов параметров модели шума

Параметры шума	$M$ , В	$\sigma_{ш}$	$U_{ср\ ампл}$ , В	$U_{действ}$ , В	ОСШ, дБ	КНИ, %
Спектр в диапазоне 100–12500 Гц	0,024716	0,395	0,313	0,395	5,05	55,900
Спектр в диапазоне 300–3400 Гц	0,000541	0,224	0,178	0,284	9,99	31,650

Из таблицы 1 видно, что математическое ожидание функции шума  $M$  при ограничении спектра остается стремящимся к нулю. Ограничение спектра уменьшает не только среднее амплитудное значение сигнала по модулю  $U_{ср\ ампл}$ , но и действующее напряжение  $U_{ср\ действ}$ , улучшая тем самым отношение сигнал/шум ОСШ и значение коэффициента нелинейных искажений КНИ.

Рассмотренная модель имеет ограничение по времени моделирования и ограниченный спектр, представленный дискретным набором гармоник. Преимуществом данной модели является непрерывная функция зависимости уровня шума от времени. Недостатком модели является невозможность прогнозирования амплитуды шума на этапе задания параметров модели.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ НОРМАТИВНЫХ ПРАВОВЫХ АКТОВ СЛУЖБЫ СИГНАЛИЗАЦИИ И СВЯЗИ БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

*В. Г. ШЕВЧУК*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*В. В. СУТАКО*

*Белорусская железная дорога, г. Минск*

Согласно законам Республики Беларусь «О нормативных правовых актах Республики Беларусь» от 17 июля 2018 г. [1] и «О техническом нормировании и стандартизации» от 05 января 2004 г. [2, 3] к техническим нормативным правовым актам (ТНПА) относятся технические нормативные правовые акты в области технического нормирования и стандартизации. А также ТНПА, которые закрепляют количественные и (или) качественные требования (словесные и (или) цифровые показатели, нормативы, характеристики, правила, методики, классификации, словесные и графические описания) к объектам материального мира (в том числе к продукции (товарам), сырью и материалам (ресурсам), зданиям и сооружениям, транспортным средствам, оборудованию и иным вещам (имуществу), объектам окружающей среды), производственным, технологическим и другим аналогичным процессам (операциям) (в том числе по воздействию на объекты материального мира, заключающемуся в их разработке, преобразовании, проектировании, изыскании, обработке, переработке, производстве, строительстве, монтаже (установке), наладке, эксплуатации (использовании), хранении, перемещении (перевозке, транспортировании), реализации, утилизации (ликвидации), по технологиям выполнения работ, оказания услуг), системам управления (менеджмента), порядку (процедурам, методикам, методам) проведения (выполнения) испытаний, исследований и измерений, отбора проб и образцов, символике, упаковке, маркировке, этикеткам и их нанесению, компетентности граждан и юридических лиц в выполнении определенных работ, оказании определенных услуг; устанавливают наименования должностей (профессий) и связанные с ними квалификационные требования, термины и их определения, классификации технико-экономической и социальной информации, формы предоставления информации, правила, методы и способы поиска, получения, передачи, сбора, обработки, накопления, хранения, распространения и (или) предоставления информации, а также пользования информацией и защиты информации.

В таблице 1 приведено количество различных технических нормативных правовых актов и нормативной технической документации, действующих в настоящее время в Службе сигнализации и связи Белорусской железной дороги.

*Таблица 1– Технические нормативные правовые акты и нормативная техническая документация, действующие в Службе сигнализации и связи Белорусской железной дороги*

Наименование ТНПА и НТД	Количество ТНПА и НТД в Службе Ш
Технические регламенты Таможенного союза (Евразийского экономического союза) (ТР ТС, ТР ЕАЭС)	1
Межгосударственные стандарты (ГОСТ), введенные в действие в качестве государственных стандартов Республики Беларусь	16
Технические кодексы установившейся практики (ТКП)	9
Государственные стандарты Республики Беларусь (СТБ)	5
Стандарты государственного объединения «Белорусская железная дорога» (СТП БЧ)	164
Руководящие документы, инструкции, нормы, положения, порядки, правила, методические указания, методические рекомендации, методики, утвержденные Белорусской железной дорогой	63
Технологические документы, применяемые на Белорусской железной дороге при эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте технических средств железнодорожного транспорта, а также при проектировании объектов железнодорожного транспорта	20
<i>Всего</i>	278

Следует отметить, что Службой ежегодно подготавливаются к внедрению ряд новых ТНПА и НТД, а также проводится обновление содержаний действующих.

На рисунке 1 приведена гистограмма, иллюстрирующая процентное соотношение возраста разработки стандартов (СТП, СТП БЧ) по Службе сигнализации и связи.

Из приведенной на рисунке 1 гистограммы видно, что  $\frac{3}{4}$  данных нормативных правовых актов были разработаны и внедрены по Службе Ш в течение последних десяти лет.

В связи с техническим перевооружением систем оперативно-технологической связи на дороге, включая внедрение цифровых радиоканалов, необходимо разработать и принять соответствующие СТП БЧ. Видимо следует, подобно тому, как это сделано на Российских железных дорогах [4], разработать и принять программный ТНПА – Концепцию повышения безопасности движения на основе применения на Белорусской железной дороге многофункциональных комплексных систем регулирования движения поездов.

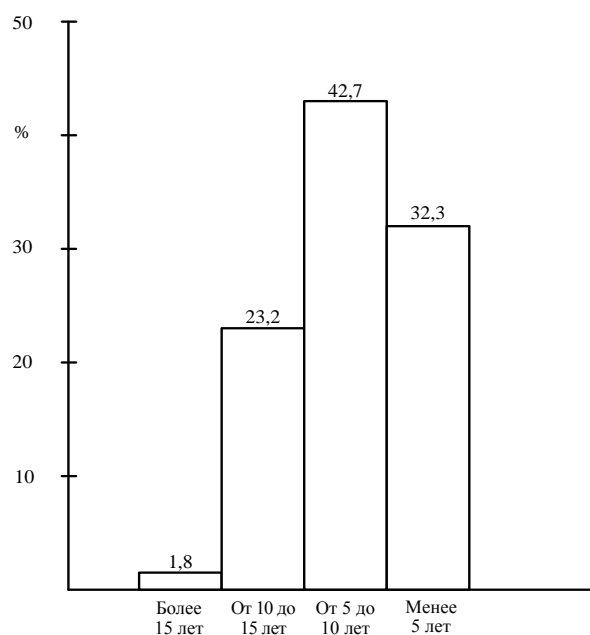


Рисунок 1 – Процентное соотношение возраста разработки стандартов (СТП, СТП БЧ) по Службе сигнализации и связи

#### Список литературы

1 О нормативных правовых актах Республики Беларусь : закон Республики Беларусь от 17 июля 2018 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pravo.by/document>. – Дата обращения : 15.09.2020.

2 О техническом нормировании и стандартизации : закон Республики Беларусь от 5 января 2004 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pravo.by/document>. – Дата обращения : 15.09.2020.

3 О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации» от 5 января 2004 г. : закон Республики Беларусь от 24.10.2016 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pravo.by/document>. – Дата обращения : 15.09.2020.

4 Концепция повышения безопасности движения на основе применения на железных дорогах многофункциональных комплексных систем регулирования движения поездов. – М., 2006. – 148 с.

# ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 535.243.25

## РАЗРАБОТКА СПЕКТРАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ВЫЯВЛЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ СОСТАВА ЭТАЛОНУ В ОРГАНИЧЕСКИХ ЖИДКИХ ОБРАЗЦАХ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

*А. И. АНДРЕЕВ, С. М. КОКИН, В. А. НИКИТЕНКО*  
*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Контроль качества веществ и материалов, используемых в технических и в бытовых целях, выявление их соответствия техническим требованиям и санитарным нормам – важная в практическом отношении задача, которая решается различными методами. Ранее [1] нами была представлена информационно-аналитическая методика получения «факсимильного» спектрального образа объекта, картины, отражающей его состав, и являющейся уникальной для каждого продукта.

Например, схема анализа жидких объектов выглядит так: на специальную кювету с пробой поочередно направляется свет разных длин волн  $\lambda$ , а интенсивность люминесценции регистрируется на одной, заданной длине волны  $\lambda^*$ . Затем процедура повторяется для другого регистрируемого значения  $\lambda^*$ , и так далее: в итоге накапливается целая серия спектров возбуждения люминесценции. Результаты измерений представляются или в виде плоского изображения, одной из осей координат которого сопоставляется набор  $\lambda$ , а второй – набор  $\lambda^*$ . Увеличение интенсивности сигнала на рисунке отображается изменением цвета от синего до красного (рисунок 1, а, б). Можно также построить 3D-картину, по одной из осей координат которой откладывается длина волны  $\lambda$ , по второй –  $\lambda^*$ , излучаемого образцом, а по третьей (по вертикали) – интенсивность  $I$  этого излучения (люминесценции). Пример подобной картины представлен на рисунке 1, в. Изменение цвета здесь также отражает вариации интенсивности регистрируемого сигнала.

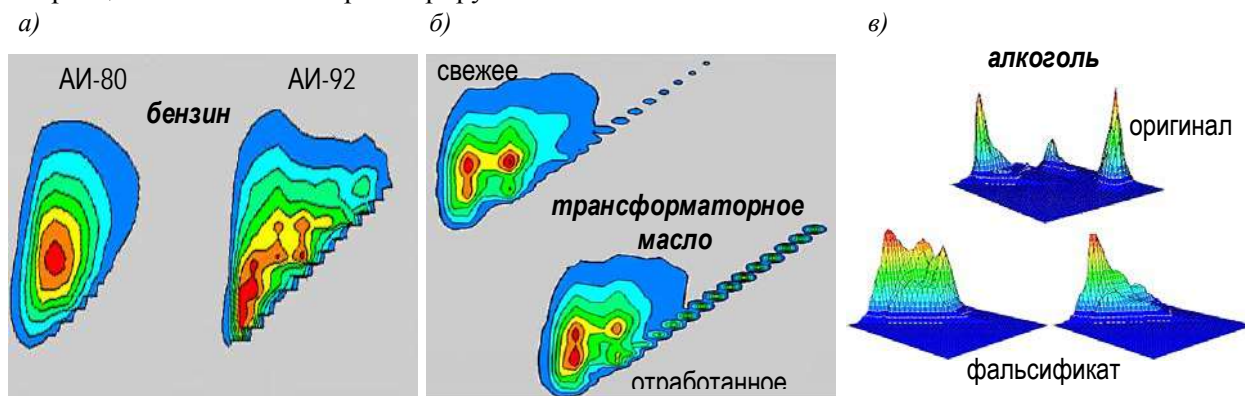


Рисунок 1 – Двумерные картины спектров проб бензина марок А-80 и А-92 (а); двумерные картины спектров свежего и отработанного трансформаторного масла (б); 3D-картина спектров оригинального образца алкоголя (вверху) и двух образцов фальсификата (внизу) (в)

Описанное представление результатов измерений является достаточно наглядным, однако количественное сравнение их с теми, которые соответствуют эталонному продукту, провести не просто: внешне картины способны различаться довольно сильно, хотя по величине сами отклонения могут быть и невелики. Как тогда определить: можно ли считать выявленные вариации состава исследуемого образца допустимыми или нет?

Целью настоящей работы являлось нахождение такого способа представления результатов, который позволял бы оперативно количественно оценивать качество исследуемого продукта. Было предложено представлять результаты измерений в виде двумерной «карты», по взаимно перпендикулярным осям которой откладываются значения  $\lambda$  и  $\lambda^*$ , при этом каждой паре координат соответ-

стует число – нормированное отношение интенсивности  $I$  регистрируемого при данных  $\lambda$  и  $\lambda^*$  сигнала к интенсивности  $I_0$  свечения при тех же длинах волн образца-эталоны.

Тестовым материалом, на котором отрабатывалась методика, являлись масла: технические (трансформаторное и используемое для заливки в колёсные буксы), и пищевые (подсолнечное и оливковое). Своевременное выявление этапа, когда масло исчерпало свой ресурс, позволяет, с одной стороны, экономить на затратах, связанных с его приобретением, и, с другой стороны, снизить объём отходов, связанных с его (возможно) преждевременной заменой (подобная задача актуальна, в том числе, и для предприятий железнодорожного транспорта).

Для отображения отличий в интенсивности по каждой из ячеек итоговой таблицы были опробованы три варианта. Первый – уже упоминавшееся отображение количественных данных ячеек в виде цветовой гаммы. При совпадении спектров сравниваемых образцов вся карта окрашивается равномерно в один цвет, например, зелёный; при отличии  $I$  от  $I_0$  на карте появляются области, цвет которых по мере увеличения отношения  $I/I_0$  плавно переходит от зелёного к жёлтому и далее к красному. Появление красных пятен на карте говорит о неидентичности образцов.

Но «цветное» представление результатов не всегда удобно для количественной оценки, в связи с чем цветовая кодировка была заменена на другую – в виде градаций серого цвета. Если разница не превышает 5 %, область на «карте» имеет белый цвет, далее с шагом 10 % области-ячейки темнеют. Различию в 100 % соответствует черный цвет. Такой способ представления результатов легко воспринимается наглядно.

Третий вариант – «экви»-линии, соединяющие ячейки с одинаковыми отличиями по интенсивности сигнала.

Второй и третий варианты представления результатов представлены на рисунке 2, на котором отображены результаты измерений спектров возбуждения подсолнечного и оливкового масел.

Картина, получаемая при неоднократном измерении спектров одного и того же сорта масла, – однотонное белое поле: это, в частности, говорит о том, что ошибка измерений не превышает 5 %. В демонстрируемом на рисунке 2 случае (сравнение подсолнечного и оливкового масел) разница спектров весьма существенна: спутать такие образцы просто невозможно.

Для графического представления результатов написана соответствующая программа [2].

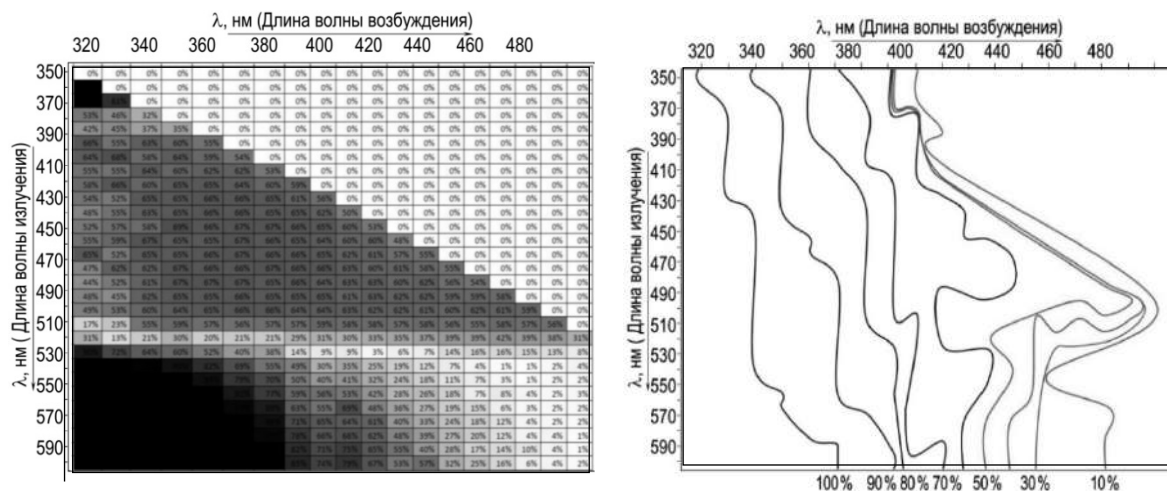


Рисунок 2 – Представление результатов измерений в виде карты с градациями серого цвета и в виде «экви»-линий. Сравниваются спектры люминесценции подсолнечного («образец») и оливкового («эталон») масел: неоднотонность картины по цвету говорит о разной природе образцов.

Понятно, что для уверенного выявления некачественных образцов требуется изначально создать библиотеку эталонов, с которыми должно проводиться сравнение. Но при этом то, какой продукт считать безусловным эталоном – вопрос, решать который необходимо отдельно в каждом конкретном случае.

#### Список литературы

- 1 Вакуленко, С. П. Контроль качества товаров в мультимодальных перевозках / С. П. Вакуленко, В. А. Никитенко, В. В. Некрасов // Мир транспорта. – № 5. – 2010 – С. 34–39.
- 2 Волосова, Н. К. Обработка результатов измерения спектров возбуждения юминесценции в процессе контроля соответствия состава продукта эталону / Н. К. Волосова, С. А. Гафарова, С. М. Кокин // Актуальные проблемы естествознания и образования в условиях современного мира : сб. материалов XXIV Междунар. конф. – Саратов : Изд-во «Техно-Декор», 2016. – С. 16–19.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ТОРМОЗНОМ БАРАБАНЕ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

С. А. АСКЕРОВ

*Азербайджанский технический университет, г. Баку*

Пара трения «барабан-накладка» барабанных колодочных механизмов колесных машин работает в условиях сложного напряженного состояния [1]. Как известно, на пятнах фактического касания происходит сильный нагрев в тонких приповерхностных слоях барабана, в результате чего образуются прижоги, термические пятна и очаги микротрещин. Вопросы разрушения пары трения «барабан-накладка» тормозного механизма при торможении колесной машины исследовались в работах [2, 3]. Разработка математической модели прогнозирования трещинообразования в барабане тормозной системы в процессе торможения колесных машин является важной и актуальной задачей. В настоящее время исследований по зарождению трещин в барабанах тормозной системы недостаточно. Исследование трещинообразования будет способствовать повышению работоспособности тормозных механизмов, обоснованному выбору конструктивных параметров при проектировании. Представляется актуальной разработка математической модели, в рамках которой можно рассмотреть образование поверхности разрыва материала в барабане тормозных механизмов автомобиля.

При повторно-кратковременном режиме торможения барабан тормозного механизма автомобиля испытывает многократное циклическое нагружение. Считается, что в материале тормозного барабана грузовой колесной машины имеется концентратор напряжений – область ослабленных межчастичных связей материала. При нагружении в прослойках перенапряженного материала образуется зона повреждения. Через некоторое число циклов нагружения (торможений) возможность деформирования в области ослабленных межчастичных связей материала исчерпывается, и раскрытие берегов зоны повреждения резко возрастает. Если раскрытие берегов зоны предразрушения (области ослабленных межчастичных связей материала) достигает предельного для данного материала тормозного барабана значения, то зарождается усталостная трещина [4–6]. Следует отметить, что в предлагаемой расчетной модели, удлинение трещины происходит непрерывно от нулевой длины.

Задача моделирования процессов образования и роста усталостной трещины сводится к последовательно решаемым упругопластическим задачам.

При эксплуатации пары трения «барабан-накладка» автомобиля в металлическом тормозном барабане будут возникать зоны предразрушения, которые представляем как области ослабленных межчастичных связей материала. Зоны повышенных напряжений будут способствовать возникновению повреждений, которые моделируем как области ослабленных межчастичных связей материала [6, 7]. Поскольку указанные зоны (прослойки перенапряженного материала) малы по сравнению с остальной частью барабана, их можно мысленно удалить, заменив разрезами, поверхности которых взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала, где материал барабана деформируется за пределом упругости.

Взаимодействие берегов зоны предразрушения моделируется путем введения между берегами связей, имеющих заданную диаграмму деформирования. При действии внешних нагрузок в связях, соединяющих берега зоны предразрушения, будут возникать нормальные  $q_y(x)$  и касательные  $q_{xy}(x)$  усилия. Таким образом, к берегам зоны предразрушения будут приложены нормальные и касательные напряжения, численно равные  $q_y(x)$  и  $q_{xy}(x)$ , соответственно. Величины напряжений, как и местоположение и размер зоны предразрушения заранее неизвестны и должны быть определены.

Экспериментальные исследования [7] возникновения областей, в которых материал деформируется за пределом упругости, показывают, что в начальной стадии нагружения зоны предразрушения представляют собой узкий вытянутый слой, а затем, с ростом нагрузки, внезапно появляется вторичная система областей, содержащих материал с частично нарушенными связями. Физическая природа таких связей и размеры зон предразрушения, в которых осуществляется взаимодействие берегов областей межчастичных связей, зависит от вида материала.

В рассматриваемом случае возникновение усталостной трещины в тормозном барабане представляет собой процесс перехода зоны предразрушения в область разорванных связей между поверхностями материала тормозного барабана. Тормозной барабан моделируем изотропным однородным телом. Твердое тело (барабан), деформируемое за пределом упругости, представляется как

тело, деформируемое упруго всюду, кроме некоторых поверхностей (полос предразрушения).

Считается, что внутренний контур барабана близок к круговому. Как известно, реальная поверхность барабана никогда не бывает абсолютно гладкой, а всегда имеет микро- или макроскопические неровности технологического характера, образующие шероховатость. Несмотря на исключительно малые размеры неровностей, образующих шероховатость, они оказывают существенное влияние на различные эксплуатационные свойства барабана.

Пусть в сечении барабана имеется прямолинейная полоса предразрушения. Рассмотрим некоторую произвольную реализацию шероховатой внутренней поверхности барабана. Считается, что выполняются условия плоской деформации. В области, занятой материалом барабана, компоненты тензора напряжений должны удовлетворять дифференциальным уравнениям плоской теории упругости. Представим границу внутреннего контура барабана в виде

$$\rho(\theta) = R_0 + \delta(\theta). \quad (1)$$

Напряженно-деформируемое состояние тормозного барабана складывается из воздействия двух силовых факторов: центробежных сил инерции и сил контактного давления со стороны колодок с фрикционными накладками, вызывающих появление сил трения и нагрев во время аварийного торможения. Барабаны вращаются с большими скоростями и подвергаются воздействию значительных центробежных сил инерции. Кроме того, высокоскоростной режим торможения сопровождается выделением большого количества тепла в сравнительно короткий промежуток, потерей тормозного момента. Возникающие при этом температурные напряжения могут привести к разрушению барабана.

Таким образом, для колесного барабанного тормоза грузового автомобиля механические напряжения играют решающую роль при кратковременных, температурные – при длительных торможениях. Кроме того, для барабана тормоза в качестве расчетного режима нужно принять свободное вращение барабана с частотой, соответствующей максимальной скорости движения автомобиля, при котором в барабане возникают напряжения, вызванные центробежными силами инерции.

Запишем второе слагаемое в правой части (1) в виде

$$\delta(\theta) = \varepsilon H(\theta), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – малый параметр;  $H(\theta)$  – функция, независимая от малого параметра.

Внешняя поверхность барабана свободна от внешних нагрузок. Внутренняя поверхность барабана в процессе торможения находится под действием контактного давления и касательных напряжений, связанных с контактным давлением по закону Амонтона–Кулона:

$$\begin{aligned} \sigma_n = -p(\theta); \quad \tau_{nt} = -fp(\theta) \quad \text{при } r = \rho(\theta) \quad \text{на площадке контакта;} \\ \sigma_n = 0; \quad \tau_{nt} = 0 \quad \text{при } r = \rho(\theta) \quad \text{вне площадки контакта.} \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $p(\theta)$  – контактное давление;  $f$  – коэффициент пары трения «барабан-накладка».

Граничные условия на берегах зоны предразрушения имеют вид

$$\sigma_y - i\tau_{xy} = q_y(x) - iq_{xy}(x). \quad (4)$$

Для определения значений контактного давления, при которых происходит зарождение трещины, постановка задачи дополняется критерием появления трещины (разрыва межчастичных связей материала). За такой критерий принято условие критического раскрытия берегов зоны предразрушения.

#### Список литературы

- 1 **Вольченко, В. И.** Барабанно-колодочные тормозные устройства / В. И. Вольченко, Ю. С. Замора. – Львов : Вища школа, 1980. – 114 с.
- 2 **Гейдаров, Ш. Г.** Исследование дефектов в тормозном барабане автомобиля / Ш. Г. Гейдаров // Ученые записки АзТУ. – 1999. – Т. VIII, № 2. – С. 171–175.
- 3 **Heidarov, Sh. G.** Fracture of friction lining of the brake system at car braking / Sh. Heidarov // International Journal of Damage mechanics. – 2002. – Vol. 11. – P. 27–39.
- 4 **Мирсалимов, В. М.** Зарождение дефекта типа трещины во втулке контактной пары / В. М. Мирсалимов // Математическое моделирование. – 2005. – Т. 17. – № 2. – С. 35–45.
- 5 **Мирсалимов, В. М.** К решению задачи механики контактного разрушения о зарождении и развитии трещины со связями между берегами во втулке фрикционной пары / В. М. Мирсалимов // Прикладная математика и механика. – 2007. – Т. 71. – № 1. – С. 132–151.
- 6 **Гасанов, Ш. Г.** Зарождение трещины на границе раздела покрытия и упругого основания / Ш. Г. Гасанов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 1(49). – С. 20–24.
- 7 **Панасюк, В. В.** Механика квазихрупкого разрушения материалов / В. В. Панасюк. – Киев : Наукова думка, 1991.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ,  
ЗАЖАТОЙ МЕЖДУ АБСОЛЮТНО ЖЕСТКИМИ ПЛАСТИНАМИ  
НА ШИРИНУ ЗОНЫ КОНТАКТА**

*АУНГ ЧЖО ТХУ, А. В. БАБАЙЦЕВ, Л. Н. РАБИНСКИЙ  
Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Проводилось исследование влияния на ширину зону контакта изменения геометрических параметров цилиндрической оболочки эллиптического сечения под давлением, зажатой между абсолютно жесткими пластинами. Исследование проводится путем аналитического моделирования метода в среде Wolfram Mathematics. В ходе аналитического моделирования была получена зависимость изменения ширины зоны контакта между оболочкой и жесткой преградой от действующего давления. Для полученного решения проводилось исследование влияния большой и малой полуосей, а также толщины оболочки на процесс изменения ширины зоны контакта в зависимости от действующего давления.

По результатам моделирования были получено, что увеличение малой полуоси влечет за собой уменьшение зоны контакта, а увеличение большой полуоси – увеличение ширины зоны контакта. Увеличение толщины оболочки уменьшает зону контакта оболочки с жесткой пластиной. Для изучения процесса скорости изменения ширины зоны контакта были получены аналитические зависимости ширины зоны контакта от изменения геометрического параметра путем аппроксимации. Форма кривой зависимости ускорения изменения ширины зоны контакта от действующего давления практически не изменяется при рассмотрении действия давления до 80 кПа. Влияние изменения толщины оболочки не существенно влияет на изменение ускорения изменения ширины зоны контакта, в отличие от изменения малой или большой полуосей.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ код проекта «Современные технологии экспериментального и цифрового моделирования и оптимизации параметров систем космических аппаратов», код проекта FSFF-2020-0016.*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ  
С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*А. В. БАБАЙЦЕВ, В. В. БОДРЫШЕВ  
Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

*В. А. БЕЛОВ  
Российский технологический университет (МИРЭА), г. Москва*

Проводилось исследование процессов деформации материалов с помощью цифровой обработки изображений. Для анализа смещений на двух изображениях определялось, для какого свойства изображения проводился анализ. Одним из наиболее распространенных методов является метод, основанный на предположении, что свет, отражаемый поверхностью материала, остается на обоих изображениях постоянным. Исходя из этого предположения, становится возможным отслеживание точек с постоянной интенсивностью изображения.

Для определения смещений между двумя изображениями использовался блок функций оптического потока (Optical Flow). При его использовании задача определения смещений сводится к решению следующего уравнения:

$$I_x u + I_y v + I_t = 0,$$

где  $I_x$ ,  $I_y$  и  $I_t$  – пространственно-временные производные яркости изображения, а  $(u, v)$  – смещение локальной области изображения по истечении времени  $\delta t$ .



Оценка скорости потока проводилась с использованием метода Horn-Schunck, заключающегося в минимизации следующей функции для поиска скорости потока  $[u, v]$  для каждого пикселя на изображении:

$$E = \iint (I_x u + I_y v + I_t)^2 dx dy + \alpha \iint \left\{ \left( \frac{du}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 + \left( \frac{du}{dy} \right)^2 + \left( \frac{dv}{dx} \right)^2 \right\} dx dy.$$

Для конкретного пикселя оценка скорости потока выглядит следующим образом:

$$u_{x,y}^{k+1} = \bar{u}_{x,y}^k - \frac{I_x [I_x \bar{u}_{x,y}^k + I_y \bar{v}_{x,y}^k + I_t]}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2};$$

$$v_{x,y}^{k+1} = \bar{v}_{x,y}^k - \frac{I_y [I_x \bar{u}_{x,y}^k + I_y \bar{v}_{x,y}^k + I_t]}{\alpha^2 + I_x^2 + I_y^2}.$$

Здесь  $[\bar{u}_{x,y}^k, \bar{v}_{x,y}^k]$ , – среднее значение окружения  $[u_{x,y}^k, v_{x,y}^k]$ . Для  $k = 0$  начальная скорость равна нулю.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ код проекта «Современные технологии экспериментального и цифрового моделирования и оптимизации параметров систем космических аппаратов», код проекта FSFF-2020-0016.*

#### Список литературы

- 1 **Horn, B. K. P.** Determining Optical Flow / B. K. P. Horn, B. G. Schunck // Artificial Intelligence. – Vol. 17, is. 1–3. – 1981. – P. 185–203.
- 2 The MathWorks, Inc. “OpticalFlowHS.” Object for Estimating Optical Flow Using Horn-Schunck Method [Electronic resource] / MATLAB : official site: [www.mathworks.com/help/vision/ref/opticalflowhs.html](http://www.mathworks.com/help/vision/ref/opticalflowhs.html).

УДК 539.3

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ ИЗ $AlSi_{10}Mg$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКА

*А. В. БАБАЙЦЕВ, А. А. ОРЕХОВ, Л. Н. РАБИНСКИЙ*  
*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

В рамках исследования рассматривались образцы, полученные из порошка  $AlSi_{10}Mg$  с использованием технологии послойного лазерного синтеза (SLM). Экспериментальные образцы были напечатаны в горизонтальном и вертикальном направлениях, а также под углом  $45^\circ$  относительно платформы построения. Печать производилась на 3D-принтере Renishaw AM400. После изготовления образцы, в соответствии с общей методикой печати, подвергались температурной обработке вместе с платформой для снятия температурных напряжений и закрытия пористости. После этого образцы вручную отделялись от рабочей платформы с использованием дремеля.

При механических испытаниях для каждого образца при каждом типе испытания была получена кривая напряжение-деформации. Исследования проводились с использованием установок Instron серии 5960, Mitutoyo SurfTest SJ-210 и сканирующем электронном микроскопе Karl-Zeiss EVO 40. При испытании на растяжение определены модуль упругости при растяжении, предел прочности, предел текучести и предельные деформации. При сжатии – предел текучести. При изгибе определялся модуль упругости при изгибе и предел текучести.

Полученные образцы подвергались механическим испытаниям, в ходе которых были получены механические характеристики материала при растяжении, сжатии и изгибе. Измерение электропроводности образцов проводилось с использованием мультиметра (ГОСТ 14014–91).

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-31-90142.*

## **СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ОБРАЗЦОВ ИЗ $AlSi_{10}Mg$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКА**

*А. В. БАБАЙЦЕВ, А. А. ОРЕХОВ, Л. Н. РАБИНСКИЙ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Рассматриваются образцы из алюминиевого сплава  $AlSi_{10}Mg$ , полученные технологией лазерного спекания порошка. Подобная технология активно развивается и изучается при создании изделий из различных металлов и сплавов. Свое применение технология лазерного спекания порошка находит при создании изделий как с простой, так и со сложной геометрией, которая, в свою очередь, повсеместно встречается в авиационной, космической, автомобильной и других областях промышленности.

Представлены результаты исследования микроструктуры образцов из порошка алюминиевого сплава, изготовленных методом лазерного спекания порошка. Проведен микрорентгеноспектральный анализ образцов порошковых материалов. Получен состав порошка по результатам микрорентгеноспектрального анализа. Исследована микроструктура поверхности образцов.

Структурные и физико-химические исследования показали наличие небольшой пористости, менее 2 %, и характерный размер зерна, менее 20 мкм.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-31-90142.*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕМНОГО СОДЕРЖАНИЯ ЗАПОЛНИТЕЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ FDM, НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

*А. В. БАБАЙЦЕВ, С. А. ШУМСКАЯ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Для облегчения конструкций при сохранении необходимой жесткости и прочности конструкций используют различные варианты сотового заполнения. Подобное заполнение широко используется в аддитивных технологиях, в первую очередь для облегчения конструкции, а также для экономии используемого материала и энергозатратности, времени печати. Материалы, получаемые с применением аддитивных технологий, обладают свойством анизотропии, именно поэтому существует сильная нелинейность в характере разрушения и их ударной прочности. Именно поэтому исследование влияний заполнения, получаемого с применением аддитивных технологий, крайне важен.

Проводилось исследование прочности заполнителя квадратной формы, изготавливаемого по технологии FDM, в зависимости от его объемного содержания при ударном воздействии. В процессе испытаний было выявлено влияние на прочность объемного процентного заполнения. Для данного исследования использовался принтер Original Prusa 3MK5 и материал PLA. Были напечатаны образцы с объемным содержанием заполнителя от 10 до 80 %, построенные в программе Ultimaker Cura 4.6.1. Заполнитель представлял собой сетчатую структуру с ячейкой в форме квадрата, размер которого выбирается в зависимости от объемного содержания образца. В качестве шаблона заполнения выбирался тип – линии, в результате получалась прямоугольная структура. Первые партии образцов были напечатаны с экструзией равной 96 % что привело к получению образцов с наличием дефектов, но ее увеличение до 98 % благотворно повлияло на качество образцов, что привело к увеличению зачетных разрушений.

Исследовались образцы на маятниковом копре в направлении удара вдоль и поперек сетчатой структуры. На основании полученных результатов и дальнейших расчетов были получены значения энергии, необходимой для разрушения образца для каждого варианта заполнителя. Выявлено влияние зависимости значения объемного содержания на прочность образцов. Полученный результат в первую очередь связан с характером разрушения образцов, а также с анизотропностью материала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ код проекта «Современные технологии экспериментального и цифрового моделирования и оптимизации параметров систем космических аппаратов», код проекта FSFF-2020-0016.*

## ПОСТРОЕНИЕ ТОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ТЕЛ С НАЧАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

С. Ю. БАБИЧ, Ю. П. ГЛУХОВ

Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев

В. Ф. ЛАЗАР

Мукачевский государственный университет, Украина

Как доказано в [3], представления напряжений и перемещений через комплексные потенциалы для сжимаемых и несжимаемых тел имеют одинаковую структуру. Отличаются лишь формулы для определения коэффициентов  $\gamma_{nm}^{(j)}$  и  $\gamma_k^{(j)}$  [2]. Таким образом, можно сформулировать следующий метод исследования (получения точных решений) динамических задач для тел с начальными напряжениями, соответствующих статических задач [3] для тел начальными напряжениями. В комплексные потенциалы [3] следует ввести комплексные параметры  $\mu_j$ , комплексные переменные  $z_j$ , коэффициенты  $\gamma_{nm}^{(j)}$  и  $\gamma_k^{(j)}$  (за исключением  $\gamma_{12}^{(1)}$  и  $\gamma_{12}^{(2)}$ ) работы [4]. Полученные таким образом комплексные потенциалы будут давать точные решения соответствующих динамических задач в общей форме для сжимаемых и несжимаемых тел.

В качестве одного из примеров применения вышеизложенного аппарата рассмотрим задачу о распространении поверхностных волн Рэлея в полуплоскости  $y_2 < 0$  с начальными напряжениями. Напомним, что под поверхностными гармоническими волнами в упругих телах с начальными напряжениями будем понимать гармонические волны, которые удовлетворяют следующим двум условиям: во-первых, волны распространяются вдоль свободной или несвободной поверхности и их амплитудные величины затухают при удалении от свободной поверхности (это условие тождественно условиям линейной классической теории упругости); во-вторых, при стремлении начальных напряжений к нулю рассматриваемые поверхностные волны переходят в поверхностные волны классической линейной теории упругости. Скорость поверхностной волны  $v$  будем считать неизвестной и для ее определения получим соответствующие уравнения. Исследования выполним отдельно для равных и неравных корней. Уравнение для определения скорости построим из условия существования отличных от нуля в полуплоскости комплексных потенциалов, обеспечивающих выполнение нулевых значений напряжений на границе полуплоскости при  $y_2 = 0$ .

Числовой пример рассмотрим для потенциала Трелоара (тело неогуковского типа). В этом случае комплексные параметры имеют вид

$$\begin{aligned} \mu_1 &= i; \quad \mu_2 = i\lambda_1\lambda_2^{-1}\sqrt{1-\varepsilon_2^2\lambda_1^{-2}} \equiv i\lambda_1\lambda_2^{-1}\sqrt{1-v^2c_{sy_2}^{-2}}; \\ \mu_1 &\neq \mu_2; \quad \mu_3 = i\lambda_1\lambda_2^{-1}\sqrt{1-\varepsilon_2^2\lambda_1^{-2}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $v$  – скорость поверхностной волны;  $c_{sy_2}$  – скорость волны сдвига, поляризованной в плоскости  $y_1Oy_2$  и распространяющейся вдоль оси  $Oy_1$  в теле с начальными напряжениями.

При  $v < c_{sy_2}$  получаем случай нервных корней, следовательно, уравнение для определения скорости волн Рэлея имеет вид

$$\mu_2\gamma_{21}^{(2)} - \mu_1\gamma_{21}^{(1)} = 0. \quad (2)$$

Примем, что для полуплоскости выполняется условие  $S_{22}^0 \equiv \sigma_{22}^{*0} = 0$ , то есть граница полуплоскости не нагружена. Согласно [5] в случае неравных корней характеристического уравнения комплексные потенциалы имеют вид

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_{22} &= 2\operatorname{Re}[\Phi_1'(z_1) + \Phi_2'(z_2)]; \\ \tilde{Q}_{21} &= -2\operatorname{Re}[\mu_1\gamma_{21}^{(1)}\Phi_1'(z_1) + \mu_2\gamma_{21}^{(2)}\Phi_2'(z_2)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{Q}_{12} &= -2\operatorname{Re}\left[\mu_1\gamma_{12}^{(1)}\Phi_1'(z_1) + \mu_2\gamma_{12}^{(2)}\Phi_2'(z_2)\right]; \\ \tilde{Q}_{11} &= 2\operatorname{Re}\left[\mu_1^2\gamma_{11}^{(1)}\Phi_1'(z_1) + \mu_2^2\gamma_{11}^{(2)}\Phi_2'(z_2)\right]; \\ u_k &= 2\operatorname{Re}\left[\gamma_k^{(1)}\Phi_1(z_1) + \gamma_k^{(2)}\Phi_2(z_2)\right].\end{aligned}\quad (3)$$

Из (2) и [3] получим

$$\begin{aligned}\mu_1\gamma_{21}^{(1)} - \mu_2\gamma_{21}^{(2)} &\equiv -\frac{i}{2} \frac{(x^3 + x^2 + 3x - 1)}{x(1 + x^2)} = 0; \\ x &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_2^2}{\lambda_1^2}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c_{sy_2}^2}}.\end{aligned}\quad (4)$$

В (4) введены обозначения [3].

В дальнейшем, как отмечалось в [3], будем рассматривать достаточно медленные движения. В данном случае ограничимся рассмотрением дозвуковых движений, в связи с чем будем считать, что  $v < c_{sy_2}$ .

Из (2) и (4) получим одно уравнение:

$$x^3 + x^2 + 3x - 1 = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) совпадает с соответствующим уравнением работы [1]. Обозначим через  $x_*$  положительный действительный корень уравнения (5), тогда из второго выражения (4) получим

$$v_*^2 \equiv c_R^2 = c_{sy_2}^2 (1 - x_*^2 \lambda_2^2 \lambda_1^{-2}) = \lambda_1^2 c_s^{02} (1 - x_*^2 \lambda_2^2 \lambda_1^{-2}). \quad (6)$$

Выражение определяет скорость волн Рэлея в неуголковском теле с начальными напряжениями.

Если начальное состояние определяется также в рамках плоской деформации, т. е.  $\lambda_3 = 1$ , то из (6) с учетом  $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$  находим

$$v_*^2 = c_R^2 = c_{sy_2}^2 (1 - x_*^2 \lambda_1^{-4}). \quad (7)$$

Результаты (5)–(7) совпадают с известными результатами, полученными другим методом [3], а также методами, приведенными в [5].

#### Список литературы

- 1 Галин, Л. А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости / Л. А. Галин. – М. : Наука, 1980. – 303 с.
- 2 Гузь, А. Н. Контактна взаємодія пружних тіл з початковими напруженнями / А. Н. Гузь, С. Ю. Бабич, В. Б. Рудницький. – Київ : Вища школа. – 1999. – 304 с.
- 3 Гузь, А. Н. Статика и динамика упругих оснований с начальными (остаточными) напряжениями / А. Н. Гузь, С. Ю. Бабич, Ю. П. Глухов. – Кременчуг : Press-line, 2007. – 795 с.
- 4 Гузь, А. Н. Смешанные задачи для упругого основания с начальными напряжениями / А. Н. Гузь, С. Ю. Бабич, Ю. П. Глухов. – Saarbrücken : LAMBERT Acad. Publ., 2015. – 468 с.
- 5 Babich, S. Yu. Contact problems for elastic bodies with initial stresses (rigid punches) / S. Yu. Babich, A. N. Guz, V. B. Rudnitskii // Int. Appl. Mech. – 1989. – Vol. 25, is. 8. – P. 735–748. – doi: <https://doi.org/10.1007/BF00887636>.

УДК 539.3

### ВЛИЯНИЕ СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТНУЮ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ДЕФОРМИРОВАННОГО УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

А. М. БАГНО, Г. И. ЩУРУК

Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев

В теории разрушения установлено, что потеря поверхностной устойчивости упругого тела может стать начальным стартовым этапом разрушения конструкции, поэтому определению величины параметра критического укорочения, при котором возникает указанное явление, уделяется особое внимание.

В данной работе для исследования устойчивости упруго-жидкостного волновода, состоящего из упругого полупространства и слоя жидкости, применяются модели, учитывающие начальные напряжения в твердом теле, а также вязкость и сжимаемость жидкости. При этом используются трехмерные линеаризованные уравнения Навье – Стокса для жидкости и трехмерные линеаризованные уравнения теории упругости конечных деформаций для твердого тела. Предполагается, что жидкость находится в состоянии покоя и тепловые эффекты не учитываются. В качестве подхода выбраны постановки задач и метод, основанные на применении представлений общих решений линеаризованных уравнений движения вязкой сжимаемой жидкости и предварительно напряженного несжимаемого упругого тела, предложенные в работах [1–7].

При этом специфику рассматриваемой задачи отражают динамические и кинематические граничные условия

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_1|_{z_2=0} = \tilde{P}_1|_{z_2=0}; \quad \tilde{Q}_2|_{z_2=0} = \tilde{P}_2|_{z_2=0}; \quad \tilde{P}_1|_{z_2=h} = 0; \quad \tilde{P}_2|_{z_2=h} = 0; \\ v_1|_{z_2=0} = \frac{\partial u_1}{\partial t}|_{z_2=0}; \quad v_2|_{z_2=0} = \frac{\partial u_2}{\partial t}|_{z_2=0}, \end{aligned}$$

где  $h$  – толщина слоя жидкости;  $\tilde{Q}_j$  и  $\tilde{P}_j$  – составляющие напряжений, соответственно, в упругом теле и жидкости;  $u_i$  – компоненты вектора смещений упругого тела;  $v_i$  – составляющие вектора возмущений скорости жидкости относительно состояния покоя;  $\lambda_i$  – укорочения ( $\lambda_i < 1$ ) упругого полупространства в направлениях координатных осей;  $\mu^*$  – динамический коэффициент вязкости жидкости.

Для анализа распространения возмущений, гармонически изменяющихся во времени, решение системы уравнений находим в классе бегущих волн. Далее решаем задачи на собственные значения для уравнений движения упругого тела и жидкости, а также определяем соответствующие собственные функции. После подстановки общих решений в граничные условия и выполнения ряда преобразований получаем дисперсионное уравнение.

В дальнейшем дисперсионное уравнение решалось численно. При этом расчеты проводились для гидроупругой системы, состоящей из несжимаемого упругого полупространства и слоя жидкости. В качестве материала для упругого полупространства выбиралась высокоэластичная резина, упругие свойства которой описываются упругим потенциалом Трелоара.

Было установлено, что для чисто упругого полупространства при сжатии и укорочении, равном  $\lambda_1 \approx 0,54$  (более точное значение  $\lambda_1 \approx 0,543688$ ), т. е. при уменьшении длины высокоэластичного несжимаемого тела на 46 % величина фазовой скорости волны Рэлея обращается в нуль. Это свидетельствует о том, что в условиях плоского напряженно-деформированного начального состояния для высокоэластичного несжимаемого неогуковского тела при сжатии  $\lambda_1 \approx 0,54$  возникает явление поверхностной неустойчивости. Отметим, что это значение совпадает с величиной, ранее полученной в теории устойчивости [8] и соответствует значению параметра критического укорочения  $\lambda_{кр}$  [8].

В случае гидроупругого волновода с вязкой жидкостью ( $\bar{\mu}^* = 0,001$ ) фазовая скорость поверхностной волны Стоунли обращается в нуль при  $\lambda_1 \approx 0,543695$ . Это свидетельствует о том, что в условиях плоского напряженно-деформированного начального состояния поверхность упругого полупространства гидроупругой системы, контактирующая со слоем вязкой жидкости ( $\bar{\mu}^* = 0,001$ ), при сжатии  $\tilde{\lambda}_{кр} = \lambda_1 \approx 0,543695$  теряет поверхностную устойчивость. Для упругого полупространства, не взаимодействующего с жидкостью ( $\bar{\rho}_0 = 0$ ), как отмечено ранее, явление поверхностной неустойчивости возникает при  $\lambda_{кр} = \lambda_1 \approx 0,543688$ . Эти различия между значениями  $\tilde{\lambda}_{кр}$  и  $\lambda_{кр}$  свидетельствуют о том, что наличие слоя вязкой сжимаемой жидкости ( $\bar{\mu}^* = 0,001$ ) приводит к понижению порога поверхностной неустойчивости волновода и возникновению ее раньше ( $\tilde{\lambda}_{кр} > \lambda_{кр}$ ) при меньшем сжатии ( $\tilde{\lambda}_{кр} = \lambda_1 \approx 0,543695 > \lambda_{кр} = \lambda_1 \approx 0,543688$ ).

Показано, что в гидроупругой системе, состоящей из упругого полупространства и слоя идеальной ( $\bar{\mu}^* = 0$ ) жидкости, потеря поверхностной устойчивости ( $\tilde{\lambda}_{кр} = \lambda_1 \approx 0,54369$ ) возникает раньше,

чем в чисто упругом полупространстве ( $\bar{p}_0 = 0$ ) [8], но позже, чем в гидроупругой системе с вязким жидким слоем ( $\bar{\mu}^* = 0,001$ ). При этом для значений параметров критического укорочения имеет место соотношение  $\tilde{\lambda}_{кр} = \lambda_1 \approx 0,543695 > \tilde{\lambda}_{кр} = \lambda_1 \approx 0,54369 > \lambda_{кр} = \lambda_1 \approx 0,543688$ .

Нетрудно видеть, что нагружение упругого полупространства слоем жидкости существенно не изменяет условия возникновения поверхностной неустойчивости, поскольку величины параметров критического укорочения чисто упругого полупространства  $\lambda_{кр}$ , а также гидроупругих систем  $\tilde{\lambda}_{кр}$  и  $\tilde{\lambda}_{кр}$  отличаются на весьма малую величину.

Таким образом, развитая линеаризованная теория волн применительно к высокоэластичным несжимаемым телам позволяет исследовать волновые процессы не только в общем и ряде частных случаев, но также возможность и условия возникновения явления поверхностной неустойчивости как в упругом полупространстве, так и в гидроупругой системе.

**Заключение.** Анализ полученных числовых результатов показал, что влияние конечных начальных деформаций упругого полупространства на характеристики волнового процесса в гидроупругой системе проявляется не только количественно, но и качественно. Большие предварительные деформации могут привести не только к изменению величин фазовых скоростей и дисперсионных свойств поверхностных волн, но и к более существенному изменению параметров волнового процесса в гидроупругой системе в целом. В результате их действия в упруго-жидкостном волноводе может возникнуть явление поверхностной неустойчивости, приводящее к прекращению процесса распространения волн и переноса волновой энергии.

#### Список литературы

- 1 Гузь, А. Н. Динамика сжимаемой вязкой жидкости / А. Н. Гузь. – Киев : А.С.К., 1998. – 350 с.
- 2 Гузь, А. Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями / А. Н. Гузь. – Киев : А.С.К., 2004. – 672 с.
- 3 Гузь, А. Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями: в 2 ч. Ч. 1. Общие вопросы. Волны в бесконечных телах и поверхностные волны / А. Н. Гузь. – Saarbrucken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 501 с.
- 4 Гузь, А. Н. Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями: в 2-х ч. Ч. 2: Волны в частичноограниченных телах / А. Н. Гузь. – Saarbrucken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 505 с.
- 5 Гузь, А. Н. Введение в динамику сжимаемой вязкой жидкости / А. Н. Гузь // Saarbrucken : LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. – 244 с.
- 6 Guz, A. N. Aerohydroelasticity Problems for Bodies with Initial Stresses / A. N. Guz // Int. Appl. Mech. – 1980. – Vol. 16. – No. 3. – P. 175–190.
- 7 Guz, A. N. Dynamics of Compressible Viscous Fluid / A. N. Guz // Cambridge : Cambridge Scientific Publishers, 2009. – 428 p.
- 8 Гузь, А. Н. Устойчивость упругих тел при конечных деформациях / А. Н. Гузь. – Киев : Наук. думка, 1973. – 272 с.

УДК 519.71, 51-74, 681.5, 303.732.4, 62.752; 621.534; 629.4.015

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ НАЛИЧИИ РЫЧАЖНЫХ СВЯЗЕЙ

*Р. С. БОЛЬШАКОВ, А. В. НИКОЛАЕВ*

*Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация*

Эксплуатация оборудования и аппаратуры транспортного и технологического назначения, используемого на промышленных предприятиях, в горной промышленности, строительстве и других отраслях, связана с применением вибрационных технологий. Решению задач, связанных с оценкой, формированием и управлением динамическим состоянием машин, используемых в этих отраслях, посвящен ряд научных работ [1–3]. Также достаточно разнообразны конструктивно-технические решения и подходы, позволяющие получать требуемые режимы работы таких машин [4, 5].

В предлагаемом докладе рассматриваются особенности формирования динамического состояния технической системы при наличии рычажных связей в её составе.

**I Общие положения. Постановка задачи.** Расчетная схема исходного технического объекта представляет собой механическую колебательную систему с тремя степенями свободы, как показано на рисунке 1. В структуре системы используется рычажный механизм, обеспечивающий перемещение дополнительных пригрузов  $m_1$  и  $m_2$  на концах элементов рычажного механизма в т.  $A, B$ . Рабочий орган машины представлен твердым телом, обладающим массой  $M$  и моментом инерции  $J$ ; рабочий орган опирается на упругие опоры, входящие в систему связанных между собой (рисунок 1) пружин и рычажного механизма с центром вращения в т.  $O_2$ .

Рычажный механизм имеет центр вращения в т.  $O_2$ , который может в случае необходимости изменять свое положение и соответственно варьировать значение передаточного отношения, определяемое выражением

$$i = \frac{l_{20}}{l_{10}}, \quad (1)$$

где  $l_{10}, l_{20}$  – размеры плеч рычажного механизма.

Наличие передаточного отношения  $i$  предопределяет связь между координатами  $y_{10}$  и  $y_{20}$

$$y_2 = iy_1, \quad (2)$$

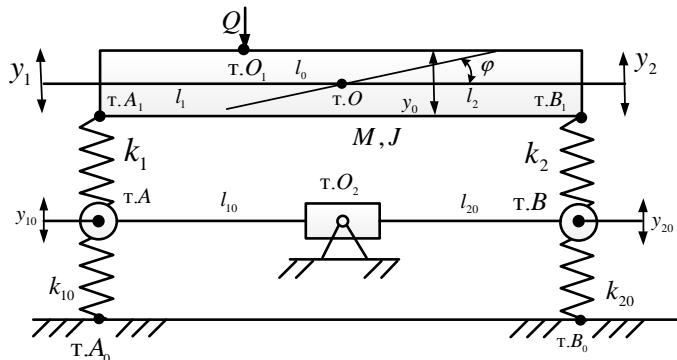


Рисунок 1 – Расчетная схема вибрационной технологической машины при наличии рычажных связей

что может использоваться как возможность построения самонастраивающихся систем автоматического управления динамическим состоянием технологической машины.

Для построения математической модели вибрационной машины (см. рисунок 1) используется система дифференциальных уравнений движения, получаемая после нахождения выражений для кинетической и потенциальной энергий. Применение преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях

$$\bar{y}_1 \left[ (Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 \right] - y_2'' (Jc^2 - Mab)p^2 - k_1 \bar{y}_{10} = \bar{Q}(a + c_1), \quad (3)$$

$$\bar{y}_2 \left[ (Mb^2 + Jc^2) + k_2 \right] - \bar{y}_1 (Jc^2 - Mab)p^2 - k_2 i \bar{y}_{10} = 0, \quad (4)$$

$$\bar{y}_{10} \left[ (m_1 + m_2 i^2)p^2 + k_1 + k_{10} + i^2(k_2 + k_{20}) \right] - k_1 \bar{y}_1 - k_2 i \bar{y}_2 = \bar{Q}(b - c_1). \quad (5)$$

Здесь  $P = j\omega$  – комплексная переменная ( $j = \sqrt{-1}$ ); значок  $\langle - \rangle$  над переменной означает ее изображение по Лапласу [1, 3].

## II Анализ динамических свойств системы при наличии рычажных связей.

Трансформация исходной системы уравнений движения и исключение переменной  $y_{10}$  позволяет получить передаточную функцию межпарциальных связей

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{(b - c_1) \left[ (Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 - \frac{k_1^2}{N} \right] + (a + c_1) \left[ (Jc^2 - Mab)p^2 - \frac{k_1 k_2 i}{N} \right]}{(a + c_1) \left[ (Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 - \frac{k_2^2 i}{N} \right] + (b - c_1) \left[ (Jc^2 - Mab)p^2 + \frac{k_1 k_2 i}{N} \right]}. \quad (6)$$

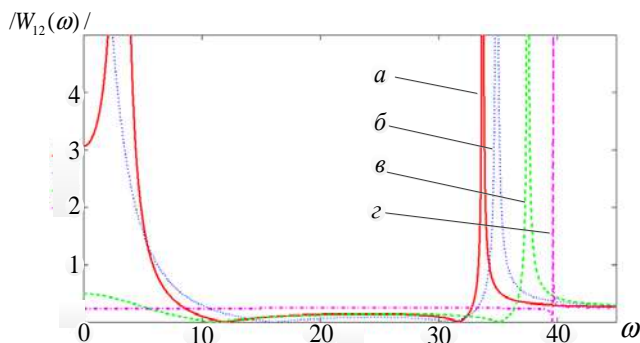


Рисунок 2 – Графики амплитудно-частотных характеристик при изменении передаточного отношения

Выражение (6) даёт возможность получить при заданных параметрах: а)  $l_{20} = 0,8$  м;  $l_{10} = 0,2$  м; б)  $l_{20} = 0,6$  м;  $l_{10} = 0,4$  м; в)  $l_{20} = 0,4$  м;  $l_{10} = 0,6$  м; г)  $l_{20} = 0,2$  м;  $l_{10} = 0,6$  м) амплитудно-частотные характеристики, которые могут быть использованы для разработки технологии формирования и поддержания необходимых режимов работы системы (рисунок 2).

Учитывая свойства передаточной функции  $W_{12}(p)$ , можно отметить, что свойства системы могут корректироваться, оцениваться и формироваться под необходимые регламенты.

**Заключение.** Предложенный метод расширения возможностей системы, основанный на свойствах рычажных механизмов, изменение параметров которых позволяет корректировать динамические режимы. Предложена методика упрощенного подхода к оценке динамических свойств системы, основанная на исключении переменных и переходе исходной системы к системе с двумя степенями свободы, что позволяет ввести в рассмотрение ряд новых динамических свойств. Получены амплитудно-частотные характеристики при изменении передаточных отношений рычажных механизмов.

#### Список литературы

1 **Елисеев, С. В.** Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных технологических машин: связность движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи) / С. В. Елисеев. – Иркутск : ИрГУПС, 2018. – 692 с.

2 **Eliseev, S. V.** Theory of oscillations. Structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects / S. V. Eliseev, A. V. Eliseev. – Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2019. – 521 p.

3 **Большаков, Р. С.** Особенности вибрационных состояний транспортных и технологических машин. Динамические реакции и формы взаимодействия элементов / Р. С. Большаков. – Новосибирск : Наука, 2020. – 411 с.

4 **Елисеев, С. В.** Возможности структурного математического моделирования в оценке динамических свойств технологических вибрационных машин / С. В. Елисеев, Р. С. Большаков, И. С. Ситов // Системы. Методы. Технологии. – 2019. – № 1 (41). – С. 7–15.

5 The dynamical condition of the vibration machine: nodes of oscillations, flexural centers, connectivity parameters / S. V. Eliseev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Collection of materials of the International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019) / Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISIS», Polzunov Altai State Technical University, Crimean Federal University, Inlink Ltd. and International Union of Machine Builders. – 2020. – 044004.

УДК 004.94, 004.8

## АНАЛИЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМЕРДЖЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Г. В. ВАНЬКИНА, Т. О. СУНДУКОВА*

*Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, Российская Федерация*

Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) интегрируют информационные, сенсорные, управляющие и коммуникационные технологии для предоставления транспортных услуг. Их пользователи варьируются от обычных пассажиров до политиков и градостроителей. Учитывая окружение и сложность этих систем, их изучение в реальных условиях зачастую неосуществимо. Моделирование помогает решить данную задачу, при этом представляет свои собственные проблемы: могут быть непреднамеренные ошибки при переходе от моделей к коду; исследовательские платформы часто смещают моделирование; трудно сравнивать работы, в которых используются разные модели и инструменты. Для преодоления выявленных проблем рассмотрим метод для разработки моделей на основе моделей, называемый эмерджентным моделированием [11]. Он основан на специфическом языке моделирования, который поддерживает интегрированную спецификацию множества аспектов ИТС: людей, их транспортных средств и внешней среды; сети датчиков и исполнительных механизмов, удобно расположенных и распределенных, которые формируют базу результатов. Фреймворк работает с редактором моделей для создания спецификаций, совместимых с языком описания и обработки, генератором кода для создания приложения с использованием спецификаций платформы. В технической и исследовательской литературе существуют также рекомендации, помогающие исследователям в применении этой инфраструктуры.

Концепция умного города предстает как ответ на вызовы, возникающие при управлении сильно взаимосвязанными физическими и информационными технологиями (ИТ) инфраструктур во взаимоотношениях с их сообществами и окружающей средой [3]. Цель состоит в том, чтобы использовать преимущества искусственного интеллекта в таких сложных системах для получения более эффективной, устойчивой и адекватной среды [5]. ИТС [10] играют ключевую роль в этом контексте, их функционал направлен на улучшение трафика в плане безопасности, устойчивости и снижения затрат времени, денег, энергии и воздействия на окружающую среду. Для этой цели эти системы используют повсеместное присутствие сетей датчиков и исполнительных механизмов (Sensor



Networks – SNs), интегрированных в устройства пользователей, транспортные средства и окружающую среду интеллектуальных мест, обеспечивают высокую доступность данных об участниках дорожного движения и их деятельности [6].

Развитие таких сложных систем сталкивается с серьезными проблемами [4, 6, 10]. Во-первых, их потенциальное воздействие на окружающую среду и живые существа затрудняет создание подходящих контролируемых сред для экспериментов. Во-вторых, эти системы обычно включают в себя несколько распределенных компонентов (как аппаратных, так и программных), часто встроенных в другие элементы, такие как транспортные средства, телефоны, светофоры или дороги. Такая система имеет высокие затраты на разработку, тестирование и развертывание. В-третьих, существует множество взаимодействующих элементов в реальной обстановке трафика, что затрудняет проверку гипотез о поведении ИТС.

Моделирование представляется полезным инструментом для решения вышеперечисленных проблем [9], оно позволяет контролировать соответствующие параметры задачи, проводить многочисленные эксперименты и постепенно развивать ИТС (постепенно заменять модели и программные реализации реальными компонентами и средой). Такой подход также имеет некоторые недостатки [1], главным образом связанные с трудностями обеспечения согласованности между результирующим моделированием и исходной абстрактной моделью.

Модельно-управляемая инженерия (Model-Driven Engineering – MDE) [2] была предложена в качестве способа преодоления таких ограничений моделирования. При разработке на основе моделей исследователи в основном уточняют свои модели, используя модели, совместимые с четко определенными языками моделирования (Modeling Languages – MLs). Эти модели объединяются и уточняются (добавляя новую информацию или модифицируя ее) до тех пор, пока не становится возможным генерировать из них код. Преобразования автоматизируют некоторые повторяющиеся модификации моделей, кода и других связанных с ними артефактов. Вся информация, необходимая для создания симуляции, представляется в явном виде, что облегчает проверку артефактов с помощью теорий и перекрестную проверку среди экспериментов. Одна и та же теоретическая модель поведения объектов может быть основой для моделирования на разных платформах, различные модели транспортных потоков в городе могут быть сопоставлены с реализациями на одной и той же платформе, и все они могут быть повторно использованы и проверены в разных проектах, если они сохраняют одну и ту же теоретическую основу или инфраструктуру моделирования.

В зарубежной литературе активно предлагается и анализируется структура MDE для разработки имитационных моделей ИТС. Эта структура включает в себя: ML для своих экспертов; редактор моделей и инструменты генератора кода; рекомендации по применению этих элементов. Все рассматриваемые фреймворки используют подходы MDE, а все их MLs следуют агентной парадигме [2, 3]. Рассматриваемый метод эмерджентного моделирования продемонстрировал свои неоспоримые положительные результаты, при этом необходимо учитывать сохраняющиеся возможные риски и проблемы. Во-первых, метамодель должна быть обогащена дополнительными примитивами, при этом примитивы для представления порядка задач или предпочтений недоступны. В частности, спецификация деталей транспортного средства и их действий невозможна в силу индивидуальности объекта, дорожной ситуации, поведения водителя и других субъективных факторов [8]. Во-вторых, определенные ограничения на модель, в частности, в количестве экземпляров класса, отношениях наследования или значениях атрибутов, не могут быть выражены. Использование языка ограничений [7] могло бы уменьшить неопределенность без необходимости прибегать к коду. В-третьих, необходимо расширить руководящие принципы развития, которые указывают на возможное упорядочение шагов и оставляют для определения метамодели указания на то, как идентифицировать различные концепции моделирования. Идентификационные подсказки также должны быть перенесены в спецификацию процесса. В-четвертых, для подтверждения правильности выбранной структуры требуются дополнительные эксперименты. Современные исследования ограничены по количеству, типам моделируемых объектов и рассматриваемым моделирующим инфраструктурам, что свидетельствует о необходимости продолжать эксперименты в данной области.

#### Список литературы

- 1 **Axtell, R.** Agent-based modeling: Understanding our creations / R. Axtell, J. Epstein // The Bulletin of the Santa Fe Institute. – 1994. – Vol. 9. – No. 4. – P. 28–32.
- 2 **Bézivin, J.** Model driven engineering: An emerging technical space / J. Bézivin // International Summer School on Generative and Transformational Techniques in Software Engineering. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. – P. 36–64.

- 3 Understanding smart cities: An integrative framework / H. Chourabi [et al.] // 45th Hawaii international conference on system sciences. – IEEE, 2012. – P. 2289–2297.
- 4 Towards the development of intelligent transportation systems / L. Figueiredo [et al.] // ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings. – IEEE, 2001. – P. 1206–1211.
- 5 **Harrison, C.** A Theory of Smart Cities / C. Harrison, I. A. Donnelly // In Proceedings of the 55th Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences (ISSS 2011). – Hull, UK. – P. 1–15.
- 6 **Klein, L. A.** Sensor Technologies and Data Requirements for ITS / L. A. Klein. – Artech House Publishers Norwood, MA, USA. – 2001. – 549 p.
- 7 Object Management Group. Object Constraint Language, Object Management Group [Electronic resource]. – 2018. – Mode of access : <http://www.omg.org/>. – Date of access : 28.08.2020.
- 8 Tokyo virtual living lab: Designing smart cities based on the 3D-internet / H. Prendinger [et al.] // IEEE Internet Computing. – 2013. – Vol. 17. – No. 6. – P. 30–38.
- 9 **Pursula, M.** Simulation of traffic systems-an overview / M. Pursula // Journal of geographic information and decision analysis. – 1999. – Vol. 3. – No. 1. – P. 1–8.
- 10 **Tewolde, G. S.** Sensor and network technology for intelligent transportation systems / G. S. Tewolde // 2012 IEEE International Conference on Electro/Information Technology. – IEEE, 2012. – P. 1–7.
- 11 **Сундукова, Т. О.** Эмерджентное моделирование и математическое образование XXI века / Т. О. Сундукова, Г. В. Ваныкина, Г. Н. Колесников // Вопросы теории и практики инновационного развития науки и образования. – 2018. – С. 44–51.

УДК 621.891

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФРИКЦИОННОЙ ПАРЫ ТОРМОЗНОГО МЕХАНИЗМА С РАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ

*Э. С. ВЕЛИЗАДЕ*

*Азербайджанский технический университет, г. Баку*

Одним из важнейших узлов, определяющих безопасность, надежность и долговечность колесных машин является фрикционная пара «барабан-накладка» тормозного механизма. Эффективность работы многих типов фрикционных пар тормозного механизма в значительной степени зависит от температуры трущихся элементов. Трущаяся пара «барабан-накладка» грузового автомобиля работает в условиях сложного напряженного состояния. Для управления процессами трения и изнашивания в паре трения «барабан-накладка» тормозного механизма необходимо исследование разрушения материала при трении, вызванного контактным действием температуры и температурного градиента. Тепловым разрушением при разработке пары трения тормозного механизма автомобиля на стадии проектирования можно управлять [1–3] конструкторско-технологическими методами, в частности геометрией поверхности трения. Решение таких задач механики по построению микрогеометрии трибосопряжения будет способствовать уменьшению теплонапряженности и износа.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние фрикционной накладке при торможении. При многократном повторно-кратковременном режиме торможения происходит взаимодействие между контактирующими поверхностями, возникают силы трения, приводящие к изнашиванию материалов сопряжения. Для определения контактного давления необходимо рассмотреть износоконтактную задачу о вдавлении накладке в поверхность тормозного барабана [4].

Проведем теоретический анализ по определению микрогеометрии поверхности трения, которая обеспечивала бы распределение температуры трущейся поверхности близкое к равномерному. Таким образом, выбором микрогеометрии поверхности трения добьемся снижения температуры.

В качестве управляющих переменных используем параметры микрогеометрии поверхности трения. В качестве математической модели принимаем дифференциальные уравнения термоупругости с соответствующими граничными условиями, которым должны удовлетворять компоненты тензора напряжений и вектора перемещений в накладке и тормозном барабане, а также кинетическое уравнение абразивного износа материалов накладке и барабана.

Считается, что к внутренней поверхности барабана прижимается накладке с другими механическими характеристиками. Область контакта занимает всю ширину накладке и не меняется в процессе торможения. Предполагаем, что выполняются условия плоской деформации. Отнесем накладку к полярной системе координат  $r\theta$  и представим неизвестную границу наружного контура накладке в виде

$$r = \rho(\theta), \quad \rho(\theta) = R + \varepsilon N(\theta). \quad (1)$$

Здесь функция  $N(\theta)$  подлежит определению,  $\varepsilon$  – малый параметр.

Неизвестный внутренний контур барабана ищется в аналогичном виде, в котором подлежит определению функция  $N_1(\theta)$ . Функции  $N(\theta)$  и  $N_1(\theta)$  ищутся в виде рядов Фурье.

Требуется определить микрогеометрию поверхности трения, т. е. функции  $N(\theta)$  и  $N_1(\theta)$ , при которых обеспечивалось бы равномерное распределение температуры на контактной поверхности трущейся пары.

Условие, связывающее перемещения накладки и барабана, имеет вид

$$v_1 + v_2 = \delta(\theta) \quad (|\theta| \leq \theta_0). \quad (2)$$

Здесь  $\delta(\theta)$  – осадка точек поверхности накладки и барабана, определяемая формой поверхности накладки и барабана, а также величиной прижимающей силы  $P$ ;  $2\theta_0$  – угол обхвата фрикционных накладок.

В зоне контакта действуют нормальное давление  $p(\theta, t)$  и касательное усилие, связанное с контактным давлением по закону Амонтона – Кулона. Усилия трения  $\tau_{r\theta}(\theta, t)$  способствуют тепловыделению в области контакта. Общее количество тепла в единицу времени пропорционально мощности сил трения. Количество тепла, выделяемое в единицу времени на единичной площади контакта с координатой  $\theta$ , будет  $Q(\theta, t) = vfp(\theta, t)$ , где  $v$  – скорость движения автомобиля в момент торможения;  $f$  – коэффициент трения пары. Общее количество тепла  $Q(\theta, t)$  будет расходоваться следующим образом: поток тепла в накладку  $Q_n(\theta, t)$  и поток тепла на повышение температуры барабана  $Q_b(\theta, t)$ .

Для перемещений накладки и барабана имеем

$$v_1 = v_{1e} + v_{1r} + v_{1w}; \quad v_2 = v_{2e} + v_{2r} + v_{2w}, \quad (3)$$

где  $v_{1e}$  – термоупругие перемещения точек контактной поверхности накладки;  $v_{1r}$  – перемещения, вызванные смятием микровыступов поверхности накладки,  $v_{1w}$  – перемещения, вызванные изнашиванием поверхности накладки;  $v_{2e}$ ,  $v_{2r}$ ,  $v_{2w}$  – то же для барабана.

Для определения  $v_{1e}$ ,  $v_{1r}$  и  $v_{2e}$ ,  $v_{2r}$  решаются задачи термоупругости для накладки и барабана соответственно. Коэффициенты теплопроводности материала в осевом, окружном и радиальном направлении приняты одинаковыми и независимыми от координат и температуры. Накладка моделируется круговым (кривым) брусом с сечением, близким к узкому прямоугольнику.

Для определения  $v_{1w}$  и  $v_{2w}$  используется кинетическое уравнение изнашивания материала для накладки и барабана [5].

Температурные функции, напряжения и перемещения в накладке и барабане, а также контактное давление ищем в виде разложений по малому параметру. С помощью метода возмущений для граничной задачи термоупругости, получаем последовательность краевых задач для накладки с круговыми границами для внутренней и внешней поверхности. Каждое из приближений удовлетворяет системе дифференциальных уравнений плоской термоупругости. Решение краевой задачи теории теплопроводности в каждом приближении ищется методом разделения переменных. При решении задачи термоупругости в каждом приближении используется термоупругий потенциал перемещений и метод степенных рядов.

На основе полученного решения задачи термоупругости и интегрирования кинетического уравнения изнашивания материала накладки в нулевом приближении находим перемещения ее контактной поверхности. Аналогично решается задача термоупругости для тормозного барабана и находится перемещение контактной поверхности. Найденные величины подставляются в основное контактное условие (2) в нулевом приближении. Алгебраизацию основного контактного уравнения проводим аналогично [1]. В результате получаем бесконечную алгебраическую систему. Полученные системы позволяют численными методами найти температуру, контактное давление в нулевом приближении. Аналогично строится решение износоконтактной задачи в первом приближении.

При известных функциях  $N(\theta)$  и  $N_1(\theta)$  полученные системы дают возможность найти температуру, контактное давление, напряжения и износ фрикционной пары. Полученная алгебраическая система уравнений пока не является замкнутой. Для построения недостающих уравнений требуем равномерного распределения температуры на контактной поверхности. Формула для температуры поверхности трения показывает, что температура линейно зависит от искомым коэффициентов ря-

дов Фурье функций  $H(\theta)$  и  $H_1(\theta)$ . Для нахождения коэффициентов функций  $H(\theta)$ ,  $H_1(\theta)$  используем принцип наименьших квадратов.

Найденное решение поставленной задачи позволяет на стадиях проектирования и изготовления выбирать микрогеометрию поверхности трения фрикционной пары «барабан-накладка», обеспечивающую равномерное распределение температуры на поверхности контакта. Это дает возможность повысить надежность и долговечность тормозного механизма автомобиля.

#### Список литературы

1 **Mirsalimov, V. M.** Minimization of the thermal state of the hub of a friction pair / V. M. Mirsalimov, P. E. Aknundova // Engineering Optimization. – 2018. – Vol. 50, is. 4. – P. 651–670.

2 **Mirsalimov, V. M.** Inverse problem of contact fracture mechanics for a hub of friction pair taking into account thermal stresses / V. M. Mirsalimov, P. E. Aknundova // Mathematics and Mechanics of Solids. – 2019. – Vol. 24, is. 6. – P. 1763–1781.

3 **Mirsalimov, V. M.** Optimum problem on wear decrease for a hub of friction pair / V. M. Mirsalimov, P. E. Aknundova // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2020. – Vol. 27, is. 5. – P. 353–363.

4 **Мирсалимов, В. М.** Износоконтактная задача о вдавлении колодки с фрикционной накладкой в поверхность барабана / В. М. Мирсалимов, Ш. Г. Гасанов, Ш. Г. Гейдаров // Труды XII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию ИМАШ РАН «Трибология – машиностроению». – Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. – С. 341–344.

5 **Горячева, И. Г.** Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с.

УДК 539.3

## НАНОИНДЕНТИРОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОЛИЭФИРНОЙ И ЭПОКСИДНО-ПОЛИЭФИРНОЙ ОСНОВЕ НА СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ

*А. Г. ГЕТМАНОВ, М. И. МАРТИРОСОВ, Л. Н. РАБИНСКИЙ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Наноиндентирование – метод, позволяющий определять механические и усталостные свойства различных пленок, покрытий и материалов на наноуровне. Исследования проводились на стальных образцах прямоугольной формы  $5 \times 10$  мм, на которые наносилась порошковая полимерная краска на полиэфирной и эпоксидно-полиэфирной основе от фирм-производителей Akzo Nobel (Голландия) и Teknos (Финляндия) электростатическим распылением в покрасочной камере Gema (Швейцария). Изучались образцы различных цветов по международному каталогу RAL (анализировалась цветовая гамма из 26 покрытий). Перед нанесением покрытий на исследуемые образцы проводилась предварительная подготовка поверхностей: обезжиривание и фосфатирование. Для повышения механических свойств и придания поверхности дополнительной износостойкости и ударопрочности на окрашенную поверхность наносился прозрачный керамический нанолак CeramiClear Deltron D8105 фирмы PPG Industries (США). Этот лак содержит микроскопические керамические частицы, которые беспорядочно плавают в жидком лаке, а затем, затвердевая в печи полимеризации, образуют густую сетчатую структуру, которая выступает в качестве защитного слоя окрашенной поверхности и существенно улучшает её эксплуатационные свойства.

Толщина покрытия (краска + лак) исследуемых образцов составляла  $\sim 60$ – $80$  мкм и контролировалась электронным толщиномером QuaNix 7500 (Германия), предназначенным для измерения толщины покрытия на ферромагнитных и неферромагнитных поверхностях. Для экспериментов использовался измерительный комплекс Nano Test 600 (Великобритания). Приводятся основные характеристики этого комплекса, его техническое описание, рассматривается перечень работ, которые можно проводить на этом комплексе. Предлагается методика и программа проведения экспериментов.

В работе использовались различные типы инденторов (пирамида Берковича, конус со сферическим наконечником и другие). Проводилась топография поверхности лакокрасочных покрытий. Компьютерная система комплекса Nano Test 600 определяла: максимальную глубину проникновения индентора, пластическую деформацию, твердость покрытия по Бринеллю, приведенный модуль упругости (модуль упругости системы: образец + индентор), упругое восстановление, податливость

контакта и ряд других характеристик. Индентирование образцов проводилось в 10 точках с постоянной скоростью 0,05 мН/с до достижения заданной максимальной нагрузки 10 мН. Теоретические расчеты выполнялись с помощью программного обеспечения на основе модели Оливера – Фарра.

Выработаны рекомендации по практическому использованию изучаемых покрытий для придания различным металлическим изделиям промышленного назначения повышенной прочности, износостойкости и долговечности. Выявлено влияние красящих пигментов (химический состав) на исследуемые характеристики образцов с покрытиями.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-01-00517).*

УДК 622.692.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ ДЕФЕКТНОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

М. В. ГОРОХОВА

*Нижегородский филиал Самарского государственного университета путей сообщения,  
Российская Федерация*

В настоящее время в производстве труб для магистральных трубопроводов произошли большие изменения. Наряду с разработкой и созданием труб из перспективных марок стали с пониженным содержанием серы и фосфора продолжают использоваться трубы из традиционных марок стали, изготовленные по улучшенным технологиям. К таким в первую очередь следует отнести прямошовные трубы, изготовленные с одним продольным швом для всех диаметров, и спиральношовные трубы, которые изготавливаются по улучшенным технологиям формирования сварного шва, условий термообработки и содержанию примеси в стали.

Были выполнены теоретическое и экспериментальное исследования по сравнению прочности и долговечности таких труб в условиях одновременного воздействия внутреннего давления и изгиба. Основная задача работы состояла именно в определении и сравнении прочности труб большого диаметра разной технологии изготовления на различных этапах разрушения в условиях повторно-статического нагружения внутренним давлением: инкубационного периода зарождения трещины; развития трещины до критических размеров; инициирование трещины с потерей герметичности трубы.

В рамках выполненного исследования проведена оценка условий разрушения сварных труб. Так как технические условия на производство сварных труб предполагают равнопрочность сварного шва и основного металла трубы, то при статическом испытании внутренним давлением справедливо предполагалось равновероятностное разрушение трубы по сварному шву и основному металлу. Практика испытаний сварных труб показывает, что действительно, при однократном нагружении разрушения труб происходят как по сварным швам, так и основному металлу. При этом разрушение спиральношовных труб по сварным швам практически отсутствуют, а по продольным швам случаи разрушения составляют около 40 % от испытаний.

В таблице 1 приведены данные по результатам испытания прямошовных труб.

**Таблица 1 – Результаты испытаний сварных труб**

№ п/п	Сечение трубы, мм	Марка стали	$R_{\text{разр}}$ , кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{разр}}$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_{\text{разр}}}{\sigma_{\text{нормат}}}$	Место разрыва относительно продольного шва
1	720×9	17ГС	140	55,3	1,06	В 30 мм от шва
2	720×9	17ГС	140	55,3	1,06	В 115 мм от шва
3	720×9	17ГС	158	62,5	1,20	В 215 мм от шва
4	720×9	17ГС	145	57,3	1,10	В 460 мм от шва
5	530×7,5	17ГС	125	43,6	0,84	По сварному шву
6	530×7,5	17ГС	132	46,0	0,88	Противопол. обр.
7	530×9	14ХГС	160	46,3	0,89	Противопол. обр.
8	530×9	14ХГС	158	45,6	0,88	Около шва
9	530×7	10Г2С1	135	50,5	0,97	Около шва
10	530×7	10Г2С1	135	50,5	0,97	Около шва

Разрушение трубы, содержащей зону конструктивной концентрации напряжений (сварной шов), реализуется либо за счет исчерпания пластичности в зоне концентрации напряжений, либо в мембранной зоне с образованием утонения в месте разрыва, аналогично случаю испытания стандартных образцов. Конкретно место образования разрыва зависит от уровня концентрации напряжений в сварном шве, вида напряженного состояния, сопротивления материала пластическому деформированию, пластичности материала.

Было проанализировано разрушение трубы вне сварного шва. В этом случае условием достижения предельного состояния трубы в мембранной зоне было принято равенство мембранных напряжений временному. В зоне разрушения наблюдалось характерное утонение стенки трубы, аналогичное образованию шейки при испытании стандартных образцов. Условием достижения предельного состояния трубы в зоне сварного шва является, согласно деформационному критерию прочности, достижение местной пластической деформации величины предельной пластичности материала, или, что аналогично, равенство местных напряжений истинному сопротивлению разрыву материала. При одинаковых значениях временного сопротивления основного металла трубы, металла шва и металла околошовной зоны разрушение сварной трубы при статических испытаниях внутренним давлением происходит при давлении меньшим рассчитываемому по теоретическим формулам.

Выполненные экспериментальные исследования и расчеты показали, что условием разрушения труб по сварному шву является превышения теоретического коэффициента концентрации напряжений. Так, для продольного шва условием разрушения трубы по сварному шву является превышение теоретического коэффициента концентрации значения  $\alpha = 3,4$ . Для спирального шва ( $\beta = 60^\circ$ ) получено, что условием разрушения по сварному шву является превышение теоретического коэффициента концентрации значения  $\alpha = 4,4$ . Следует также отметить, что увеличение предельного коэффициента концентрации напряжений в сварном шве определяется, в основном, углом его наклона к оси трубы.

Проведенные ранее обследования сварных труб магистральных нефтепроводов показали, что для продольных швов характерны коэффициенты концентрации напряжений в диапазоне от 2 до 8, а для спиральных швов от 2 до 4. Различия в формировании швов и оценка возможных концентраторов напряжений требует отдельного детального рассмотрения.

Сравнительные испытания внутренним давлением с повышенной нагрузкой прямошовных и спиральношовных труб большого диаметра показали их высокие прочностные характеристики, соответствующие современным требованиям и не уступающие зарубежным аналогам. Вместе с тем различие в технологии их изготовления влияет на особенности реализации их эксплуатационной надёжности.

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования показали, что разрушение сварных труб при статическом нагружении внутренним давлением у прямошовных труб возможно как по сварному шву, так и по основному металлу трубы в мембранной зоне, а разрушение спиральношовных труб реализуется исключительно по основному металлу трубы в мембранной зоне.

Кроме этого, при изготовлении прямошовных труб применяется процедура их правки в экспандере, что приводит к формированию дополнительного дефекта формы сварного шва – угловатости («домика»), а как следствие – увеличению уровня концентрации напряжений в сварном шве, снижению прочностного и усталостного ресурса трубы. Уровень исчерпания пластичности материала в зоне сварного шва при экспандировании недостаточен для снижения статической прочности труб, но оказывает влияние на усталостный ресурс трубы. Поэтому вопрос влияния технологии изготовления труб на уровень концентрации напряжений в сварном шве требует отдельного детального исследования. При этом предварительный анализ влияния технологии изготовления труб показал, что уровень концентрации напряжений в сварных швах прямошовных и спиральношовных труб примерно одинаков.

Однако выполненные исследования позволили сделать вывод о том, что прямошовные трубы имеют особое преимущество при их использовании на участках трубопроводов, подверженных повышенным изгибным и продольным нагрузкам (участки воздушных переходов, слабонесущие грунты, повышенные перепады температур и т. п.). Поэтому такие трубы могут применяться при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов по перекачке жидких и газообразных продуктов без ограничений.

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ОБРАБОТКА ТРАНСПОРТНОГО ШТРИХОВОГО КОДА

*М. А. ГУНДИНА, Н. А. ГРУЗД*

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

При обработке изображений, полученных промышленным оборудованием, решается некоторый круг задач, таких как улучшение качества изображений; измерение его числовых характеристик; распознавание областей интереса, сжатие изображений и др.

Современные устройства формирования изображений позволяют решать комплекс технических и научных задач [1–3], требующих синтеза и анализа компьютерных методов обработки.

Развитие микроэлектроники позволяет повысить сложность применяемых алгоритмов для решения прикладных задач.

В зарубежной и отечественной литературе [4–6] рассматривается набор задач искусственного интеллекта, который может быть применен для автоматической сегментации, распознавания образов, описания и представления деталей, морфологического анализа изображения [5, 6].

Для количественного анализа изображения как двумерного массива яркости часто используется одномерный профиль поверхностной яркости.

Под профилем изображения вдоль некоторой линии будем понимать функцию, характеризующую распределение яркости изображения вдоль этой линии.

Рассмотрим особенности реализации программы, позволяющей построить профили изображения для дальнейшего определения резкого изменения цвета, контуров изображения и его распознавания.

Профиль вдоль некоторой линии может использоваться для считывания штрихового кода изделия [7]. Поскольку метод кодирования сигнала в штриховых кодах заключается в определенной последовательности чередования штрихов и пробелов различной ширины, профиль изображения содержит всю необходимую информацию, для того чтобы считать штриховой код. На транспортную упаковку в виде штрихового кода наносится 14-разрядный номер (рисунок 1).



Рисунок 1 – Пример штрих-кода

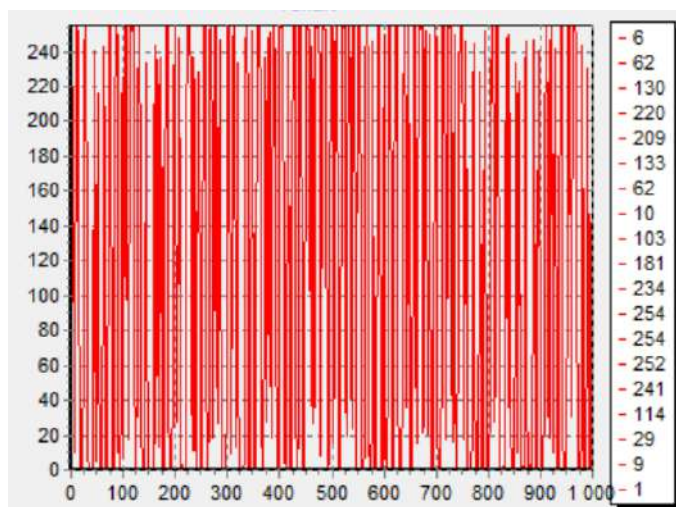


Рисунок 2 – Профиль изображения вдоль горизонтальной линии

На профиле заметны промежутки постоянного значения яркости штрих-кода, а также положения начала и конца штриховой последовательности (границы объекта).

В микросистемной технике построение и анализ профиля яркости используется для количественного контроля дефектов поверхности кремниевых пластин. На его основе могут быть сформированы изображения дефектов при контроле полупроводниковых пластин.

Анализ профиля вдоль линии позволяет получить данные о распределении яркости изображения вдоль произвольно нанесенной на изображение линии. График профиля показывает по оси  $X$  положения точек, а по оси  $Y$  измеренное значение яркости. Таким образом, по оси  $X$  представлена пространственная шкала, а по оси  $Y$  шкала в единицах измерения яркости в соответствии с текущей калибровкой. Линия, вдоль которой строится профиль, может иметь любую ориентацию и любую длину.

Главное меню программы содержит четыре пункта: загрузка, построение профиля для цветного изображения, перевод в полутоновое изображение и построение для него профиля (рисунок 3).

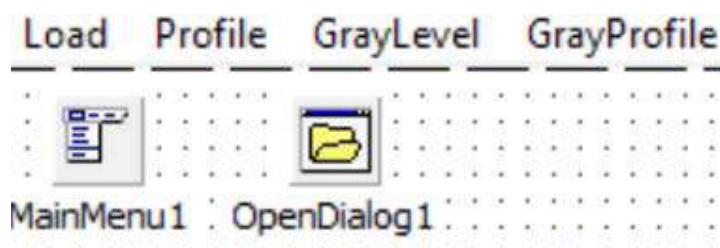


Рисунок 3 – Основные пункты главного меню

Загрузка изображения осуществляется следующим образом:

```
if OpenDialog1.Execute then  
Image1.Picture.LoadFromFile(OpenDialog1.FileName);  
bp:=TBitmap.Create;  
bp.Assign(image1.picture.Graphic);  
Image1.picture.Bitmap.Assign(bp);
```

Для построения линии, вдоль которой будет строиться профиль, используются процедуры `Image1.MouseDown`, `Image1.MouseUp`, позволяющие обработать событие нажатия и снятие нажатия кнопки мыши.

Для перевода в полутоновое изображение используется пользовательская функция:

```
function RgbToGray(RGBColor:TColor):TColor;  
var Gray:Byte;  
begin  
Gray:=Round((0.3*GetRValue(RGBColor))+  
(0.59*GetGValue(RGBColor))+  
(0.11*GetBValue(RGBColor)));  
Result:=RGB(Gray,Gray,Gray);end;
```

Данная программа может быть использована для компьютерной диагностики кремниевых пластин для сегментации.

#### Список литературы

- 1 **Breton, V.** The Healthgrid White Paper / V. Berton // Studies in Health Technology and Informatics. – 2005. – Vol. 112. – P. 249–318.
- 2 **Мирошников, М. М.** Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. – СПб. : Лань, 2010. – 704 с.
- 3 **Gonzalez, R. C.** Digital Image Processing / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. – New Jersey : Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002. – 797 p.
- 4 **Bribiesca, E.** A chain code for representing 3-D curves / E. Bribiesca // Pattern Recog. – 2000. – Vol. 33, No. 5. – P. 755–765.
- 5 **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.
- 6 **Рудаков, П. И.** Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x / П. И. Рудаков, И. В. Сафонов. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 416 с.
- 7 **Пахомов, В. В.** Использование современных технологий для учета движения товаров / В. В. Пахомов, В. В. Кугач // Вестник фармации. – 2005. – № 4 (30). – С. 3–14.



## **УФ-С ИЗЛУЧЕНИЕ: ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ COVID-19**

*А. М. ДАВЫДОВ*

*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

В настоящее время транспортная сфера находится в состоянии адаптации к обновленным условиям деятельности в условиях продолжающейся пандемии COVID-19 и начинает постепенное восстановление после кризиса. Введение ограничений во всех видах транспортных перевозок – от использования личного и общественного транспорта в городах до осуществления пассажирских и грузовых перевозок как внутри стран, так и между ними, обуславливает необходимость пересмотра ряда логистических, технических и технологических процессов и условий функционирования транспортного комплекса.

В числе адаптационных мер – повышение безопасности перевозок за счет дезинфекции воздуха, воды и поверхностей транспортных средств, а также различных элементов транспортной инфраструктуры с использованием бактерицидного ультрафиолетового излучения (УФ-С).

В докладе представлены материалы к обсуждению существующих, по мнению автора, проблем в данной сфере:

- технология дезинфекции с помощью УФ-С излучения (в диапазоне 260–285 нм) существует уже достаточно давно, но крупномасштабные исследования об эффективности дезинфицирующих методов против COVID-19 пока еще не опубликованы;

- отсутствуют установленные ВОЗ регламенты использования на транспорте УФ-С источников излучения для инактивации коронавируса COVID-19;

- разнообразие искусственных источников излучения ультрафиолета и разработанных на их основе УФ-С установок по обеззараживанию поверхностей, контаминированных коронавирусом, ставит проблему выбора наиболее эффективного решения;

- ВОЗ предостерегает от использования УФ-С для дезинфекции различных частей тела. Даже небольшое количество облучения может привести к ожогам или повреждению глаз;

- проблема усугубляется тем, что в спектре искусственных энергосберегающих источников света присутствует избыточная доля синего света. Синий свет светодиодов – новая гигиеническая проблема.

Рассмотрены существующие паллиативные решения в части нормативного регулирования этих вопросов со стороны Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), Роспотребнадзора, Международного союза железных дорог, ВНИИ железнодорожной гигиены.

Акцентируется внимание на опасности канцерогенного воздействия искусственного УФ-С излучения на человека и необходимости использования соответствующих защитных мер.

Значительная часть доклада посвящена сравнительному анализу технических характеристик различных классов техногенных источников УФ-С излучения, как широко применяемых в настоящее время в различных областях науки и техники, так и альтернативных новейших разработок. В том числе:

- обычные ртутные лампы УФ-С излучения;
- амальгамные лампы;
- эксилампы;
- УФ-излучающие светодиоды;
- катодолуминесцентные источники ультрафиолетового излучения;
- импульсные ксеноновые лампы;
- лазеры.

Обсуждается мировой опыт использования УФ-С излучения для дезинфекции воздуха и поверхностей на общественном транспорте.

Спрос на решения для дезинфекции воздуха и поверхностей транспортных средств и транспортной инфраструктуры растет по всему миру. Современные УФ-С облучатели идеально подходят

для глубокой дезинфекции воздуха и поверхностей. Они оснащаются датчиком движения и блоком управления, что обеспечивает их работу только в отсутствие людей и животных.

УФ-С облучатели также можно использовать в дезинфекционных туннелях. Такой способ обработки поверхностей уже тестируется одним крупным ритейлером в Северной Америке для дезинфекции грузовых тележек.

В Индии УФ-С туннель Signify планируется использовать для дезинфекции сумок гостей при регистрации в отелях, также багажа в аэропортах и вокзалах.

Воздух в российских поездах «Иволга», которые курсируют по первым двум Московским центральным диаметрам, обеззараживается с помощью ультрафиолетовых ламп, установленных в систему вентиляции. Воздух, прежде чем попасть в салон вагона, проходит через специальные ультрафиолетовые лампы. Для увеличения бактерицидной эффективности жалюзи защитных решеток установки покрыты фотоактивным слоем на основе диоксида титана.

Система обеззараживания устанавливается на Тверском вагоностроительном заводе, входящим в состав «Трансмашхолдинг». Эффективность системы обеззараживания была протестирована во Всероссийском научно-исследовательском институте железнодорожной гигиены. Наиболее эффективной система обеззараживания воздуха в вагонах поездов «Иволга» является в летний и зимний сезоны, когда включаются системы отопления и кондиционирования.

Аналогичным образом обеззараживается воздух в московском метрополитене. В поездах серии «Ока» и «Москва» ультрафиолетовые лампы встроены в систему кондиционирования, в других используют переносные ультрафиолетовые установки.

Транспортное управление Нью-Йорка запустило пилотный проект по использованию мощных ультрафиолетовых ламп для дезинфекции вагонов и станций метро, а также автобусов города. Схема дезинфекции была разработана совместно с Колумбийским университетом, ученые которого предположили, что ультрафиолетовое излучение может использоваться для уничтожения вирусов в общественном транспорте. Лампы были приобретены у стартапа Puro Lighting, разработчики которого утверждают, что их ультрафиолетовые лампы «эффективны против вирусов класса 2 и 3, включая коронавирусы, грипп и эболу», а также напоминают, что их свет может нанести вред человеку, если на него направить лампу.

В Шанхае начали применять ультрафиолетовое излучение для дезинфекции автобусов снаружи и внутри, чтобы предотвратить заражение вредными бактериями. Полная дезинфекция одного автобуса занимает всего 10 минут. Об этом сообщается на сайте «Хуаньцюван».

Заключительные положения<sup>1)</sup>.

УФ-С излучение применяется для обеззараживания воздуха и поверхностей транспортных средств в ряде стран, но его эффективность для профилактики COVID-19 еще не доказана. Было обнаружено, что самые высокие концентрации вируса требуют довольно высокой дозировки УФ-С излучения.

На рынке имеется ряд предложений отечественных и зарубежных производителей УФ-С устройств, использующих различные физические принципы генерации бактерицидного ультрафиолетового излучения. Поскольку в настоящее время нет официально установленных процедур использования ультрафиолетового света для дезинфекции транспортных средств и помещений, для разработки правил эксплуатации и технического обслуживания УФ-С устройств, а также для обеспечения соблюдения надлежащих мер безопасности в каждом конкретном случае рекомендуется привлекать соответствующих экспертов.

Использование ультрафиолетового света ни в коем случае не является эффективным методом лечения людей, инфицированных коронавирусом. Однако благодаря своим мощным стерилизующим способностям эта технология имеет большой потенциал для управления пандемией COVID-19 другими способами. Ведутся исследования для определения конкретных УФ-лучей, которые безопасны для клеток человека и по-прежнему могут использоваться в качестве гермицидов.

---

<sup>1)</sup> Частично использованы материалы публикации Дарьи Елецкой: Можно ли убить вирус ультрафиолетом? (URL: <https://hi-news.ru/eto-interesno/mozhno-li-ubit-virus-ultrafiolptom.html>).

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
НЕОДНОРОДНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ  
ПРИ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ И УГЛАХ ПОВОРОТА НОРМАЛИ**

*В. Г. ДМИТРИЕВ, О. В. ЕГОРОВА, А. Р. ПОПОВА  
Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Рассматривается осесимметричное нелинейное деформирование в общем случае многослойных оболочечных конструкций переменной толщины  $h$  под действием статической системы поверхностных нагрузок общего или локального характера. Напряженно-деформированное состояние произвольных оболочек вращения при больших перемещениях точек координатной поверхности и неограниченных углах поворота нормали к ней описывается через изменения декартовых координат  $x, y$  в процессе упругого деформирования. Разработанная математическая модель аналогична классической модели Кирхгофа – Лява с использованием гипотезы «жесткой» нормали. Рассматриваются оболочки вращения при осесимметричном нагружении как «следающими», так и консервативными нагрузками, а также оболочки, замкнутые в полюсе. Для многослойного пакета в целом принимаются условия жесткого контакта слоев без взаимного отрыва и проскальзывания. На краях оболочки рассматриваются варианты граничных условий в виде жесткого защемления и шарнирного закрепления.

При построении дискретного аналога исходной существенно нелинейной краевой задачи используется метод конечных разностей (МКР) с построением вычислительного алгоритма решения сеточных уравнений на основе квазидинамической формы метода установления путем замены сеточных аналогов уравнений равновесия на нестационарные уравнения, совпадающие по форме с уравнениями движения оболочки в вязкой среде, характеризуемой искусственным коэффициентом вязкости  $\varepsilon$ . Параметры итерационного процесса – удельные вязкости искусственной среды  $\varepsilon$  и шаг по времени  $\Delta t$  – определяются из условия ускорения сходимости и устойчивости разностной схемы путем оценки наименьших и наибольших собственных чисел для соответствующих разностных операторов в МКР. Построена корректная конечно-разностная схема для расчета оболочек, замкнутых в полюсе, а также разработаны вычислительные алгоритмы для исследования особенностей деформирования неоднородных оболочек вращения при действии как для консервативных, так и «следающих» нагрузок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 19-01-00675).*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО  
ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

*М. С. ЕГОРОВА, О. В. ТУШАВИНА  
Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Рассматриваются физико-математические основы функционирования теплозащитных композиционных материалов (КМ) в условиях аэрогазодинамического нагрева гиперзвуковых летательных аппаратов, а также в условиях точечного воздействия высокоэнергетических излучений. На основе новых законов разложения связывающих КМ и нелинейной фильтрации предложена комплексная физико-математическая модель тепломассопереноса в анизотропных КМ с учетом связанностей полей деформации и температуры, пригодная для исследований большинства КМ, используемых в качестве теплозащитных элементов современных летательных аппаратов (ЛА). Разработана методология численного решения всей комплексной проблемы на основе экономичных абсолютно устойчивых

численных методов. Получены многочисленные результаты численного моделирования теплового состояния КМ в условиях их термического разрушения при высоких температурах.

Далее приводятся результаты численного моделирования тепломассопереноса в анизотропных композиционных материалах на основе разработанного комплекса программ, реализующего разработанную комплексную математическую модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-08-00880).

УДК 519.71, 51-74, 681.5, 303.732.4, 62.752; 621.534; 629.4.015

## О ВОЗМОЖНОСТЯХ КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. В. ЕЛИСЕЕВ, И. С. СИТОВ, Р. С. БОЛЬШАКОВ, А. В. ЕЛИСЕЕВ

Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация

Вибрационные технологические машины широко используются в различных производствах [1–3]. Реализация вибрационных технологических процессов требует решения ряда специфических задач динамики, характерных для механических колебательных систем. Значимое место среди машин, обеспечивающих вибрационные технологические процессы, занимают вибрационные стенды с рабочими органами в виде протяженных твердых тел. Вопросы формирования вибрационных полей в форме распределения амплитуд колебаний точек рабочего органа рассмотрены в работах по прикладной теории колебаний в приложениях к проблемам вибрационного перемещения, транспортирования, организации специальных режимов соударения и формирования эффектов модификации свойств поверхности деталей сложной формы [1, 4–5]. Необходимость решения вопросов повышения производительности и динамического качества вибрационных технологических машин стимулирует поиск и разработку способов решения специфических задач обеспечения надежности и безопасности эксплуатации технических объектов, аппаратуры и оборудования в условиях интенсивных динамических нагружений [6–8].

В докладе представлена оригинальная научно-методологическая позиция, реализуемая в рамках методов структурного математического моделирования, ориентированная на разработку технологии введения дополнительных связей в механическую колебательную систему в виде инерционно-упругой цепи с регулируемыми элементами.

1 Принципиальная схема технологического объекта может быть приведена к виду расчетной схемы механической колебательной системы с двумя степенями свободы (рисунок 1).

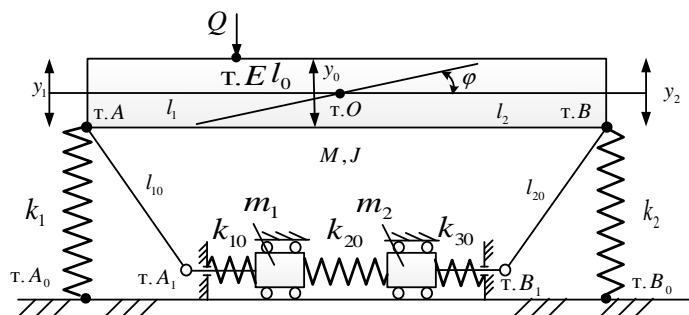


Рисунок 1 – Расчётная схема вибрационной технологической машины

2 Система состоит из твердого тела с массой  $M$  и моментом инерции относительно центра масс (т.  $O$ , рисунок 1)  $J$ . Центр масс находится на расстояниях  $l_1$  и  $l_2$  до концов твердого тела (т.  $A$ ,  $B$ ). Возбуждение колебаний относится к силовому типу и реализуется приложением гармонической силы  $Q$  в т.  $E$ , смещенной относительно центра масс на плечо  $l_0$ .

3 Для оценки динамических свойств системы рациональным представляется переход к структурным математическим моделям. В этом случае механической колебательной системе (рисунок 1) сопоставлена структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления, дифференциальные уравнения движения при нулевых начальных условиях переводятся преобразованиями Лапласа в систему в операторной форме:

$$\bar{y}_1 \left[ (Ma^2 + Jc^2 + m_1 a_{01}^2) p^2 + k_1 + k_{10} a_{01}^2 + k_{20} a_{02}^2 \right] - \bar{y}_2 \left[ (Jc^2 - Mab) p^2 - k_{20} a_{01} a_{02} \right] = \bar{Q}(b + c_1), \quad (1)$$

$$\bar{y}_2 \left[ (Mb^2 + Jc^2 + m_2 a_{02}^2) p^2 + k_2 + k_3 a_{02}^2 + k_2 a_{01} a_{02} \right] - \bar{y}_1 \left[ (Jc^2 - Mab) p^2 + k_2 a_{01} a_{02} \right] = \bar{Q}(a - c_1), \quad (2)$$

где  $p = j\omega$  – комплексная переменная ( $j = \sqrt{-1}$ ); значок  $\leftrightarrow$  над переменной означает ее изображение по Лапласу [7, 8].

4 Наглядное представление о динамических свойствах системы даёт структурная математическая модель (структурная схема), приведённая на рисунке 2.

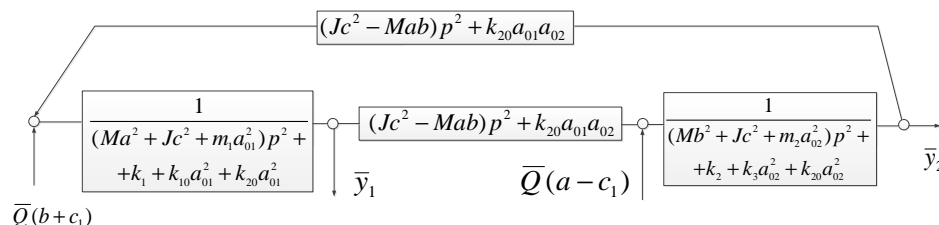


Рисунок 2 – Структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления

5 Переход к операторной форме позволяет для оценки динамических свойств использовать аналитический аппарат теории автоматического управления. Выражения для передаточных функций системы по координатам  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_2$  имеют вид:

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}}, \quad (3)$$

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}}, \quad (4)$$

6 Детализированная информация о формах движения рабочего органа вибрационной машины может быть получена из анализа передаточной функции межпарциальных связей вида:

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}. \quad (5)$$

Выражение (5) может быть использовано как основа алгоритма для решения задач корректировки, настройки и формирования динамического состояния рабочего органа в плане выбора и отслеживания определённых параметров вибрационного поля при реализации технологического процесса. Такая же алгоритмическая основа может быть использована для создания системы автоматического управления работой машины.

7 Предложен метод построения структурных математических моделей для вибрационных технологических машин, расчетные схемы которых могут приводиться к механическим колебательным системам с сосредоточенными параметрами. Показаны возможности получения передаточных функций системы и условия их преобразований для получения аналитических соотношений, необходимых для решения задач оценки, контроля и формирования динамических состояний рабочего органа. Введен ряд новых понятий, отражающих возможности изменения динамических состояний рабочих органов в направлениях формирования распределений амплитуд колебаний точек твердого тела в пределах определенных форм вибрационного поля.

#### Список литературы

- 1 Копылов, Ю. Р. Динамика процессов виброударного упрочнения / Ю. Р. Копылов. – Воронеж : ИПЦ «Научная книга», 2011. – 569 с.
- 2 De Sylva Clarence, W. Vibration. Fundamentals and Practice / W. De Sylva Clarence. – Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2000. – 957 p.
- 3 Karnovsky, I. A. Theory of vibration protection / I. A. Karnovsky, E. Lebed. – Switzerland : Springer, 2016. – 708 p.
- 4 Dynamics of mechanical system with additional ties / S. V. Eliseev [et al.]. – Irkutsk : ISU, 2006. – 315 p.
- 5 Белокобыльский, С. В. Динамика механических систем. Рычажные и инерционно-упругие связи / С. В. Белокобыльский, С. В. Елисеев, И. С. Ситов. – СПб. : Политехника, 2013. – 319 с.
- 6 Елисеев, А. В. Динамики машин. Системные представления, структурные схемы и связи элементов / А. В. Елисеев, Н. К. Кузнецов, А. О. Московских. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 381 с.
- 7 Елисеев, С. В. Прикладной системный анализ и структурное математическое моделирование (динамика транспортных технологических машин: связь движений, вибрационные взаимодействия, рычажные связи / С. В. Елисеев. – Иркутск : ИрГУПС, 2018. – 692 с.
- 8 Eliseev, S. V. Theory of oscillations. Structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects / S. V. Eliseev, A. V. Eliseev. – Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2019. – 521 p.

**НЕСТАЦИОНАРНАЯ МЕХАНОДИФФУЗИЯ  
ДЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЦИЛИНДРА  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЪЕМНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ**

Н. А. ЗВЕРЕВ

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

А. В. ЗЕМСКОВ

*НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация*

В данной работе рассматривается одномерная полярно-симметричная связанная задача с учетом релаксации диффузионных потоков, целью которой является исследование напряженно-деформированного состояния ортотропного многокомпонентного однородного бесконечного цилиндра, находящегося под действием нестационарных объемных упругодиффузионных возмущений.

Математическая постановка задачи (рисунок 1) включает в себя уравнения движения сплошной среды и  $N$  уравнений массопереноса [1–5].

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{r^2} u - \sum_{j=1}^N \alpha_1^{(j)} \frac{\partial \eta^{(j)}}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - F^i, \quad i = \overline{1, 2}, \\ -\Lambda_{11}^{(q)} \left( \frac{\partial^3 u}{\partial r^3} + \frac{2}{r} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r^3} \right) + D_1^{(q)} \left( \frac{\partial^2 \eta^{(q)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \eta^{(q)}}{\partial r} \right) + F^{(q)} &= \frac{\partial \eta^{(q)}}{\partial \tau} + \tau_q \frac{\partial^2 \eta^{(q)}}{\partial \tau^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Начальные условия принимаются равными нулю.

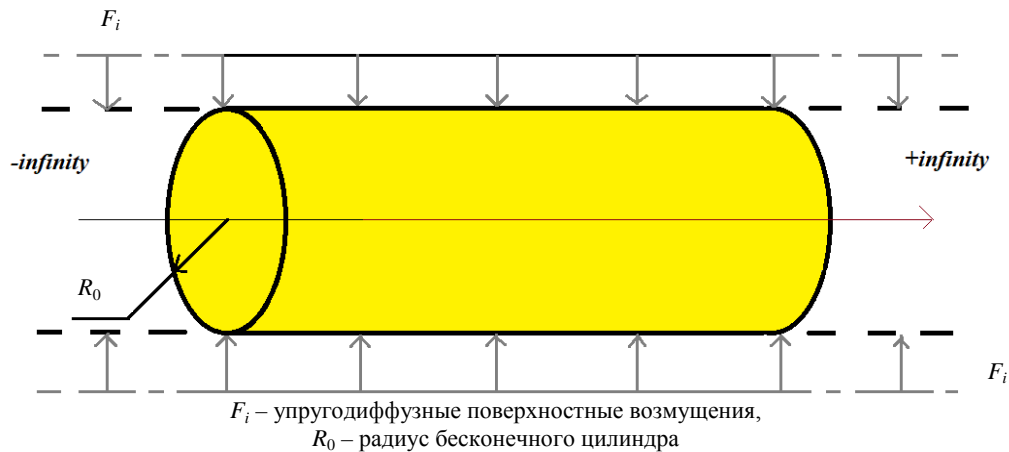


Рисунок 1 – Иллюстрация к постановке задачи

Замыкают постановку краевые условия, задаваемые по всей поверхности сплошного цилиндра

$$\begin{aligned} u|_{r=c_{12}} = 0, \quad \left[ \Lambda_{11}^{(q)} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right) - D_1^{(q)} \frac{\partial \eta^{(q)}}{\partial r} \right]_{r=c_{12}} &= 0, \\ \left( \frac{\partial u}{\partial r} + c_{12} \frac{u}{r} - \sum_{j=1}^N \alpha_1^{(j)} \eta^{(j)} \right)_{r=c_{12}} = 0, \quad \eta^{(q)}|_{r=c_{12}} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Все величины в выражениях (1), (2) являются безразмерными. Их связь с размерными дается равенствами

$$\begin{aligned} r = \frac{r^*}{L}, \quad u = \frac{u_r}{L}, \quad \tau = \frac{Ct}{L}, \quad C^2 = \frac{C_{1111}}{\rho}, \quad c_{12} = \frac{C_{1122}}{C_{1111}}, \\ \tau_q = \frac{C\tau^{(q)}}{L}, \quad \alpha_1^{(q)} = \frac{\alpha_{11}^{(q)}}{C_{1111}}, \quad D_1^{(q)} = \frac{D_{11}^{(q)}}{CL}, \quad \Lambda_{11}^{(q)} = \frac{m^{(q)} \alpha_{11}^{(q)} D_{11}^{(q)} n_0^{(q)}}{\rho CLRT_0}, \end{aligned}$$

где  $t$  – время;  $u_r$  – компоненты вектора механических перемещений;  $r^*$  – радиальная координата;  $\eta^{(q)} = n^{(q)} - n_0^{(q)}$  – приращение концентрации вещества;  $n_0^{(q)}$  и  $n^{(q)}$  – начальная и текущая концентрации  $q$ -го вещества в составе  $N$ -компонентной сплошной среды;  $m^{(q)}$  – молярная масса  $q$ -го вещества в составе  $N$ -компонентной сплошной среды;  $C_{ijkl}$  – компоненты тензора упругих постоянных;  $\rho$  – плотность среды;  $\alpha_{ij}^{(q)}$  – компоненты тензора диффузионных постоянных, характеризующие деформации, возникающие вследствие диффузии;  $D_{ij}^{(q)}$  – компоненты тензора самодиффузии;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_0$  – температура сплошной среды;  $F_i$  – удельная плотность объёмных сил,  $F^{(q)}$  – объёмная плотность источников массопереноса;  $\tau^{(q)}$  – время релаксации диффузионных потоков.

Решение задачи представлено в интегральной форме, представляющей собой свертки функций влияния данной задачи с функциями, задающими объёмные возмущения:

$$u(r, \tau) = \sum_{m=1}^{N+1} \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} \tilde{G}_{1m}(r, \xi, t) F^{(m)}(\xi, \tau - t) dt d\xi, \quad \eta_q(r, \tau) = \sum_{m=1}^{N+1} \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} \tilde{G}_{q+1,m}(r, \xi, t) F^{(m)}(\xi, \tau - t) dt d\xi. \quad (3)$$

Здесь  $\tilde{G}_{km}(r, \tau)$  ( $k, m = \overline{0, N+1}$ ) – функции Грина, являющиеся решениями краевых задач вида

$$\left( \tilde{G}_{1m}'' + \frac{1}{r} \tilde{G}_{1m}' - \frac{1}{r^2} \tilde{G}_{1m} \right) - \sum_{j=1}^N \alpha_1^{(j)} \tilde{G}_{j+1,m}' + \delta_{1m} \delta(r - \xi) \delta(\tau) = \tilde{G}_{1m}^{\sim};$$

$$- \Lambda_{11}^{(q)} \left( \tilde{G}_{1m}''' + \frac{2}{r} \tilde{G}_{1m}'' - \frac{\tilde{G}_{1m}'}{r^2} + \frac{\tilde{G}_{1m}}{r^3} \right) + D_1^{(q)} \left( \tilde{G}_{q+1,m}'' + \frac{\tilde{G}_{q+1,m}'}{r} \right) + \delta_{q+1,m} \delta(r - \xi) \delta(\tau) = \frac{\partial \tilde{G}_{q+1,m}}{\partial \tau} + \tau_q \frac{\partial^2 \tilde{G}_{q+1,m}}{\partial \tau^2}; \quad (4)$$

$$\left( \tilde{G}_{1m}' + \frac{\lambda}{r} \tilde{G}_{1m} - \sum_{j=1}^N \alpha_1^{(j)} \tilde{G}_{j+1,m} \right) \Big|_{r=1} = 0, \quad \tilde{G}_{q+1,m} \Big|_{r=1} = 0, \quad \tilde{G}_{1m} \Big|_{\tau=0} = \tilde{G}_{1m} \Big|_{\tau=0} = \tilde{G}_{q+1,m} \Big|_{\tau=0} = 0.$$

Для этих функций используются разложение в ряды по функциям Бесселя, а также интегральное преобразование Лапласа по времени [3–5].

Оригиналы функций влияния определяются с помощью вычетов и таблиц операционного исчисления.

#### Список литературы

- 1 **Deswal, S.** Axi-symmetric generalized thermoelastic diffusion problem with two-temperature and initial stress under fractional order heat conduction / S. Deswal, K. K. Kalkal, S. S. Sheoran // *Physica B: Condensed Matter*. – 2016. – Vol. 496. – P. 57–68.
- 2 **Aouadi, M.** A problem for an infinite elastic body with a spherical cavity in the theory of generalized thermoelastic diffusion / M. Aouadi // *International Journal of Solids and Structures*. – 2007. – Vol. 44. – P. 5711–5722.
- 3 **Зверев, Н. А.** Полярно-симметричная стационарная задача механо-диффузии для изотропного полого цилиндра / Н. А. Зверев, А. В. Земсков, Д. В. Тарлаковский // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XXIII Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. Т. 2.* – М.: ООО «ТР-принт», 2017. – С. 128–132.
- 4 **Зверев Н. А.** Сплошной ортотропный цилиндр под действием поверхностных полярно-симметричных стационарных возмущений / Н. А. Зверев, А. В. Земсков, Д. В. Тарлаковский // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред им. А. Г. Горшкова: материалы XXIII Междунар. симпозиума. Т. 2.* – М.: ООО «ТР-принт», 2017. – С. 132–137.
- 5 **Земсков, А. В.** Полярно-симметричная задача упругой диффузии для многокомпонентной среды / А. В. Земсков, Д. В. Тарлаковский // *Проблемы прочности и пластичности.* – 2018. – № 80 (1). – С. 5–14.

УДК 539.3

## ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЕ СО СЖИМАЕМЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

А. С. ЗЕЛЕНАЯ

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

История появления трехслойных конструкций в строительстве связана, в первую очередь, с необходимостью создания конструкций, позволяющих удешевлять строительство и сокращать расходы в период эксплуатации. Трехслойные конструкции созданы из материалов различной прочно-

сти и жесткости, где несущие слои предназначены для восприятия основной части нагрузки, а заполнитель гарантирует равномерное распределение усилий между слоями. Такое сочетание материалов способствует надежной работе трехслойных элементов при различных внешних воздействиях.

В [3–4] рассмотрено деформирование трехслойных круговых пластин, связанных с основанием Пастернака. Колебания трехслойных стержней и пластин исследовано в [5–6]. Деформирование трехслойных круговых пластин, в том числе при температурном воздействии, рассмотрено в работах [7–9]. Статьи [10–11] посвящены исследованию изгиба трехслойных круговых пластин со сжимаемым заполнителем.

Постановка задачи рассмотрена в [1]. За искомые функции принимаем продольные перемещения  $u_{kx}(x, y)$ ,  $u_{ky}(x, y)$ , и прогибы  $w_k(x, y)$  срединных поверхностей несущих слоев ( $k = 1, 2$ ). С помощью вариационного принципа Лагранжа была получена система уравнений равновесия рассматриваемой трехслойной пластины в усилиях [2].

Чтобы получить систему дифференциальных уравнений, описывающих перемещения в упругой трехслойной прямоугольной пластине со сжимаемым заполнителем, воспользуемся соотношениями закона Гука. Система примет вид

$$\begin{aligned}
 & a_1 u_{1x} - a_1 u_{2x} - a_4 u_{1x,xx} - a_5 u_{2x,xx} - a_{19} u_{1x,yy} - a_{18} u_{2x,yy} - a_{21} u_{1y,xy} - a_{23} u_{2y,xy} + \\
 & + a_2 w_{1,x} + a_3 w_{2,x} - 2a_{24} w_{1,xy} + a_{25} w_{2,xy} - 2a_6 w_{1,xxx} + a_7 w_{2,xxx} = p_x, \\
 & -a_1 u_{1x} + a_1 u_{2x} - a_5 u_{1x,xx} - a_9 u_{2x,xx} - a_{18} u_{1x,yy} - a_{20} u_{2x,yy} - a_{23} u_{1y,xy} - a_{22} u_{2y,xy} - \\
 & - a_{10} w_{1,x} - a_{17} w_{2,x} - a_{24} w_{1,xy} + 2a_{25} w_{2,xy} - a_6 w_{1,xxx} + 2a_7 w_{2,xxx} = 0, \\
 & a_1 u_{1y} - a_1 u_{2y} - a_4 u_{1y,yy} - a_5 u_{2y,yy} - a_{19} u_{1y,xx} - a_{18} u_{2y,xx} - a_{21} u_{1x,xy} - a_{23} u_{2x,xy} + \\
 & + a_2 w_{1,y} + a_3 w_{2,y} - 2a_{24} w_{1,xy} + a_{25} w_{2,xy} - 2a_6 w_{1,yyy} + a_7 w_{2,yyy} = p_y, \\
 & -a_1 u_{1y} + a_1 u_{2y} - a_5 u_{1y,yy} - a_9 u_{2y,yy} - a_{18} u_{1y,xx} - a_{20} u_{2y,xx} - a_{23} u_{1x,xy} - a_{22} u_{2x,xy} - \\
 & - a_{10} w_{1,y} - a_{17} w_{2,y} - a_{24} w_{1,xy} + 2a_{25} w_{2,xy} - a_6 w_{1,yyy} + 2a_7 w_{2,yyy} = 0, \\
 & -a_2 u_{1x,x} - a_2 u_{1y,y} + a_{10} u_{2x,x} + a_{10} u_{2y,y} + 2a_6 u_{1x,xxx} + a_6 u_{2x,xxx} + 2a_6 u_{1y,yyy} + \\
 & + a_6 u_{2y,yyy} + 2a_{24} u_{1x,xy} + a_{24} u_{2x,xy} + 2a_{24} u_{1y,xy} + a_{24} u_{2y,xy} + a_{11} w_{1,xx} + \\
 & + a_{11} w_{1,yy} - a_{12} w_{2,xx} - a_{12} w_{2,yy} + a_{15} w_{1,xxx} + a_{15} w_{1,yyy} - a_{16} w_{2,xxx} - \\
 & - a_{16} w_{2,yyy} + a_{26} w_{1,xyy} - a_{28} w_{2,xyy} + a_8 w_{1,x} - a_8 w_{2,x} = q + 0,5 p_x h_1 + 0,5 p_y h_1, \\
 & -a_3 u_{1y,y} - a_3 u_{1x,x} + a_{17} u_{2y,y} + a_{17} u_{2x,x} - a_7 u_{1y,yyy} - a_7 u_{1x,xxx} - 2a_7 u_{2y,yyy} - \\
 & - 2a_7 u_{2x,xxx} - 2a_{27} u_{2y,xy} - a_{25} u_{1y,xy} - 2a_{25} u_{2x,xy} - a_{25} u_{1x,xy} - a_{12} w_{1,xx} - \\
 & - a_{12} w_{1,yy} + a_{14} w_{2,xx} + a_{14} w_{2,yy} - a_{16} w_{1,xxx} - a_{16} w_{1,yyy} + a_{13} w_{2,xxx} + \\
 & + a_{13} w_{2,yyy} - a_{28} w_{1,xyy} + a_{27} w_{2,xyy} - a_8 w_{1,x} + a_8 w_{2,x} = 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Так как система дифференциальных уравнений (1) линейная, то решение будем искать методом Бубнова – Галеркина. Для этого необходимо искомые перемещения и внешние нагрузки разложить в ряды по системам базисных функций:

$$\begin{aligned}
 u_{kx} &= \sum_{p,m=0}^{\infty} U_{kxpm} \Psi_{xpm}(x, y), & u_{ky} &= \sum_{p,m=0}^{\infty} U_{kypm} \Psi_{ypm}(x, y), & w_k &= \sum_{p,m=0}^{\infty} W_{kpm} \Psi_{zpm}(x, y), \\
 p_x &= \sum_{p,m=0}^{\infty} p_{xpm} \Psi_{1pm}(x, y), & p_y &= \sum_{p,m=0}^{\infty} p_{ypm} \Psi_{2pm}(x, y), & q &= \sum_{p,m=0}^{\infty} q_{pm} \Psi_{3pm}(x, y),
 \end{aligned}$$

где  $\Psi_{xpm}, \Psi_{ypm}, \Psi_{zpm}, \Psi_{lpm}$  – системы базисных ортогональных функций ( $l = 1, 2, 3$ );  $U_{1xpm}, U_{2xpm}, U_{1ypm}, U_{2ypm}, W_{1pm}, W_{2pm}$  – искомые амплитуды перемещений прямоугольной трехслойной пластины со сжимаемым заполнителем, м;  $p_{xpm}, p_{ypm}, q_{pm}$  – амплитуды нагрузок, Па.

Путем выбора базисных функций  $\Psi_{xpm}, \Psi_{ypm}, \Psi_{xpm}, \Psi_{lpm}$  должны удовлетворяться кинематические граничные условия.



## Список литературы

- 1 **Зеленая, А. С.** Постановка задачи об изгибе прямоугольной трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем / А. С. Зеленая // *Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы: тез. докладов V Междунар. науч. семинара, Москва, 17–19 октября 2016 г. / МАИ (Национальный исследовательский университет).* – М., 2016. – С. 79–80.
- 2 **Зеленая, А. С.** Деформирование упругой трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / А. С. Зеленая // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки.* – 2017. – № 6 (105). – С. 89–95.
- 3 **Козел, А. Г.** Влияние сдвиговой жёсткости основания на напряжённое состояние сэндвич-пластины / А. Г. Козел // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2018. – № 6 (332). – С. 25–35.
- 4 **Козел, А. Г.** Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // *Механика. Исследования и инновации : Междунар. сб. науч. тр. – Гомель : БелГУТ, 2018. – Вып. 11. – С. 127–133.*
- 5 **Леоненко, Д. В.** Собственные колебания трехслойной круговой пластины, скрепленной с инерционным основанием / Д. В. Леоненко // *Теоретическая и прикладная механика : Междунар. науч.-техн. сб. – Минск : БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 143–149.*
- 6 **Леоненко, Д. В.** Импульсные колебания трехслойных стержней на упругом инерционном основании Пастернака / Д. В. Леоненко // *Механика. Исследования и инновации : Междунар. сб. науч. тр. / Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель, 2019. – Вып. 12. – С. 140–145.*
- 7 **Нестерович, А. В.** Уравнения равновесия трехслойной круговой пластины при неосесимметричном нагружении / А. В. Нестерович // *Теоретическая и прикладная механика.* – 2019. – Вып. 34. – С. 154–159.
- 8 **Нестерович, А. В.** Деформирование трехслойной круговой пластины при косинусоидальном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // *Проблемы физики, математики и техники.* – 2020. – № 1 (42). – С. 85–90.
- 9 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование упругопластической трехслойной круговой пластины в температурном поле / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // *Механика композитных материалов.* – 2019. – Т. 55. – № 4. – С. 727–740.
- 10 **Старовойтов, Э. И.** Нелинейное деформирование трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем / Э. И. Старовойтов, Ю. В. Захарчук // *Механика машин, механизмов и материалов.* – 2019. – № 3 (48). – С. 26–33.
- 11 **Старовойтов, Э. И.** Изгиб круговой трехслойной пластины с легким сжимаемым наполнителем / Э. И. Старовойтов, Ю. В. Захарчук // *Проблемы машиностроения и автоматизации.* – 2018. – № 4. – С. 88–97.

УДК 539.3, 539.8

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УПРУГОДИФFUЗИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОРТОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ КИРХГОФА – ЛЯВА

*А. В. ЗЕМСКОВ<sup>1,2</sup>, Д. В. ТАРЛАКОВСКИЙ<sup>2,1</sup>*

<sup>1</sup>*Московский авиационный институт (НИИ),*

<sup>2</sup>*НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

Рассматривается задача о нестационарных упругодиффузионных колебаниях прямоугольной ортотропной пластины Кирхгофа – Лява, находящейся в поле совместного действия механического и диффузионного полей (рисунок 1).

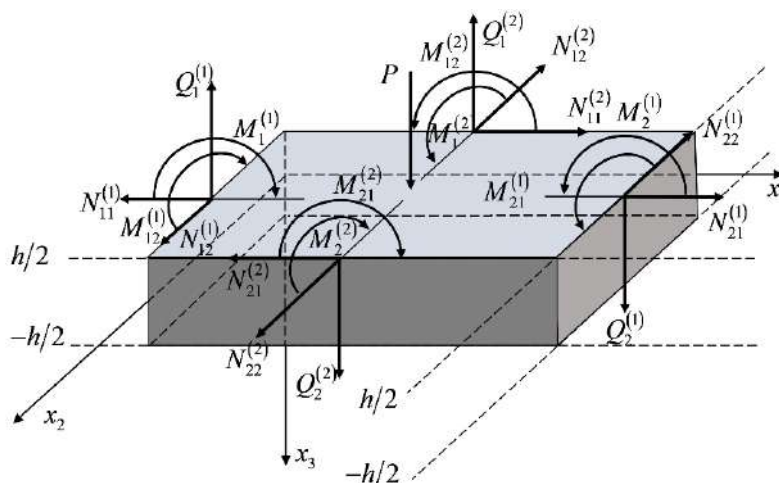


Рисунок 1 – Рисунок к постановке задачи

Для математической постановки задачи используется система уравнений механо-диффузии для анизотропных сплошных сред [1–6]. Из неё, с помощью вариационного принципа Даламбера, получена модель упругодиффузионных поперечных колебаний ортотропной прямоугольной пластины [7, 8]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x_2^2} - \frac{12}{h^2} \dot{w} = \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} + 2(C_{12} + 2C_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + C_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} + \\ & + \sum_{q=1}^N \left( \alpha_1^{(q)} \frac{\partial^2 H_q}{\partial x_1^2} + \alpha_2^{(q)} \frac{\partial^2 H_q}{\partial x_2^2} \right) - \frac{12}{h^3} \left( \frac{\partial m_2}{\partial x_2} + \frac{\partial m_1}{\partial x_1} + q \right), \quad (1) \\ & \dot{H}_q + \tau_q \ddot{H}_q = D_1^{(q)} \frac{\partial^2 H_q}{\partial x_1^2} + D_2^{(q)} \frac{\partial^2 H_q}{\partial x_2^2} + \Lambda_{11}^{(q)} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} + (\Lambda_{12}^{(q)} + \Lambda_{21}^{(q)}) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + \Lambda_{22}^{(q)} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} + \frac{12}{h^3} z_q. \end{aligned}$$

Здесь точки обозначают производную по времени. Все величины в выражении (1) являются безразмерными. Для них приняты следующие обозначения

$$\begin{aligned} x_i &= \frac{x_i^*}{l}, \quad w = \frac{w^*}{l}, \quad \tau = \frac{Ct}{l}, \quad C_{ij} = \frac{C_{ij}^*}{C_{11}^*}, \quad C^2 = \frac{C_{11}^*}{\rho}, \quad l_m = \frac{l_m^*}{l}, \quad \tau_q = \frac{C\tau^{(q)}}{l}, \quad m_i = \frac{m_i^*}{C_{11}^*}, \\ \alpha_i^{(q)} &= \frac{\alpha_i^{*(q)}}{C_{11}^*}, \quad D_i^{(q)} = \frac{D_i^{*(q)}}{Cl}, \quad \Lambda_{ij}^{(q)} = \frac{m^{(q)} D_i^{*(q)} \alpha_j^{*(q)} n_0^{(q)}}{\rho R T_0 C l}, \quad q = \frac{q^*}{C_{11}^*}, \quad z_q = \frac{L z^{(q)}}{C}, \quad h = \frac{h^*}{l}, \end{aligned}$$

где  $t$  – время;  $x_i^*$  – прямоугольные декартовы координаты;  $w^*$  – прогибы пластины;  $l$  – характерный линейный размер в задаче (в данном случае – диагональ пластины, которая имеет размеры  $l_1^* \times l_2^*$  и толщину  $h^*$ );  $\eta^{(q)} = x_3 H_q$  – приращение концентрации  $q$ -й компоненты вещества в составе  $N$ -компонентной среды;  $n_0^{(q)}$  – начальная концентрация  $q$ -го вещества;  $C_{ij}^*$  – упругие постоянные;  $\rho$  – плотность;  $\alpha_i^{*(q)}$  – коэффициенты, характеризующие объёмное изменение среды за счёт диффузии;  $D_i^{*(q)}$  – коэффициенты самодиффузии;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_0$  – температура среды;  $m^{(q)}$  – молярная масса  $q$ -го вещества;  $\tau^{(q)}$  – время релаксации диффузионных потоков;  $m_i^*$  – распределенные по поверхности моменты;  $q^*$  – распределенная по поверхности поперечная нагрузка;  $z^{(q)}$  – распределённая по поверхности плотность объёмных источников массопереноса.

Замыкают постановку начально-краевые условия, которые в случае чистого изгиба под действием изгибающих моментов  $M_k^{(l)}$ , изображенных на рисунке 1, имеют вид

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + C_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} + \sum_{q=1}^N \alpha_1^{(q)} H_q \right) \Big|_{x_1=0} = f_{111}, \quad \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + C_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} + \sum_{q=1}^N \alpha_1^{(q)} H_q \right) \Big|_{x_1=l_1} = f_{112}, \\ & \left( C_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + C_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} + \sum_{q=1}^N \alpha_2^{(q)} H_q \right) \Big|_{x_2=0} = f_{121}, \quad \left( C_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + C_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} + \sum_{q=1}^N \alpha_2^{(q)} H_q \right) \Big|_{x_2=l_2} = f_{122}, \\ & w \Big|_{x_1=0} = f_{211}(x_2, \tau), \quad w \Big|_{x_1=l_1} = f_{212}(x_2, \tau), \quad w \Big|_{x_2=0} = f_{221}(x_1, \tau), \quad w \Big|_{x_2=l_2} = f_{222}(x_1, \tau), \quad (2) \\ & H_q \Big|_{x_1=0} = f_{q+2,11}(x_2, \tau), \quad H_q \Big|_{x_1=l_1} = f_{q+2,12}(x_2, \tau), \quad H_q \Big|_{x_2=0} = f_{q+2,21}(x_1, \tau), \quad H_q \Big|_{x_2=l_2} = f_{q+2,22}(x_1, \tau), \\ & f_{111}(x_2, \tau) = -\frac{12}{h^3} M_1^{(1)}(x_2, \tau), \quad f_{112}(x_2, \tau) = -\frac{12}{h^3} M_2^{(1)}(x_2, \tau), \\ & f_{121}(x_1, \tau) = -\frac{12}{h^3} M_1^{(2)}(x_1, \tau), \quad f_{122}(x_1, \tau) = -\frac{12}{h^3} M_2^{(2)}(x_1, \tau). \end{aligned}$$

Начальные условия полагаем нулевыми.

Решения задачи (1), (2) ищется в интегральной форме. Ядрами интегральных представлений являются функции Грина, для нахождения которых используются разложения двойные тригонометрические ряды Фурье и преобразование Лапласа по времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-08-00589 А).

#### Список литературы

- 1 Еремеев, В. С. Диффузия и напряжения / В. С. Еремеев. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 182 с.
- 2 Igumnov, L. A. A two-dimensional nonstationary problem of elastic diffusion for an orthotropic one-component layer / L. A. Igumnov, D. V. Tarlakovskii, A. V. Zemskov // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2017. – Vol. 38, no. 5. – P. 808–817.
- 3 Князева, А. Г. Введение в термодинамику необратимых процессов / А. Г. Князева. – Томск : Иван Федоров, 2014. – 172 с.
- 4 Aouadi, M. Analytical and numerical results for a dynamic contact problem with two stops in thermoelastic diffusion theory / M. Aouadi, M. I. M. Copetti // ZAMM Z. Angew. Math. Mech. – 2016. – Vol. 96, no. 3. – P. 361–384.
- 5 Deswal, S. A two-dimensional generalized electro-magneto-thermoviscoelastic problem for a half-space with diffusion / S. Deswal, K. Kalkal // International Journal of Thermal Sciences. – 2011. – Vol. 50, no. 5. – P. 749–759.
- 6 Elhagary, M. A. A two-dimensional generalized thermoelastic diffusion problem for a half-space subjected to harmonically varying heating / M. A. Elhagary // Acta Mech. – 2013. – Vol. 224. – P. 3057–3069.
- 7 Afanasieva, O. A. Unsteady Elastic-Diffusion Oscillations of a Simply Supported Kirchhoff Plate Under the Distributed Transverse Load Action / O. A. Afanasieva, A. V. Zemskov // In: Gdoutos E. [et al.] : Proceedings of the Third International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. ICTAEM 2020. Structural Integrity. – Vol. 16. –Springer, Cham, 2020. – P. 181–186.
- 8 Земсков, А. В. Изотропная многокомпонентная пластина Кирхгофа под действием нестационарных упругодиффузионных возмущений / А. В. Земсков, Д. В. Тарлаковский // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVI Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. Т. 2. – М. : ООО «ТРИ», 2020. – С. 155–161.

УДК 519.876.5 + 62-551.454

## МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ КАК МОЩНЫЙ ИНСТРУМЕНТ СИНТЕЗА СУБОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А. Г. КАПУСТИН, К. В. ТЕРЕЩЕНКО

Белорусская государственная академия авиации, г. Минск

В настоящее время, по известным причинам, применяющиеся аналоговые регуляторы практически исчерпали свои возможности корректного регулирования выходных параметров автоматических систем управления [1, 2]. В работе рассмотрены вопросы проектирования регуляторов нового поколения – нечетких регуляторов систем автоматического управления в пакете *Fuzzy Logic Toolbox* вычислительной среды *Matlab*. Регуляторы *Fuzzy Logic* или нечеткие регуляторы синтезируются с помощью теории нечеткой логики, являющейся разделом машинного обучения. В общем случае машинное обучение используется для поиска математической формулы, которая при применении к набору входных данных дает желаемые результаты изменения выходных параметров системы. Виртуальная среда программирования *Matlab* позволяет создать программу синтеза аналогового регулятора нового поколения на основе нечеткой логики «*fuzzy*» (один из инструментов машинного обучения) [1–3]. В работе выполнен синтез нечеткого ПИД-регулятора напряжения для синхронного генератора мощностью 30 кВ·А.

Особенности процесса синтеза ПИД-регулятора напряжения с логикой «*fuzzy*» для *Matlab*-модели синхронного генератора следующие. В блоке *Fuzzy Logic Controller* модели генератора задается ссылка на *fis*-файл с прописанными правилами управления при помощи «*fuzzy*» логики. Данный файл создается в виде скрипта в окне программы *Matlab* и там же задается тип *tamdani*-файла.

В настройках системы указывается: количество входов и выходов регулятора; задается количество правил; описываются методы регулирования (таблица 1).

Таблица 1 – Пример создания скрипта нечеткого регулятора

Настройки системы	Входные данные	Выходные данные
<b>[System]</b> Name='F_PID' Type='mamdani' Version=2.0 NumInputs=3 NumOutputs=1 NumRules=12 AndMethod='min' OrMethod='max' ImpMethod='min' AggMethod='max' DefuzzMethod='centroid'	<b>[Input1]</b> Name='error' Range=[0 2] NumMFs=2 MF1='hight':'trapmf',[-1.8 -0.2 0.2 1.8] MF2='low':'trapmf',[0.2 1.8 2.2 3.6]	<b>[Output1]</b> Name='out' Range=[0 1] NumMFs=6 MF1='Hi(FR)':'smf',[0 0.06] MF2='Hi(F)Aver(R)':'smf',[-0.00249 0.0975] MF3='Aver(F)Hi(R)':'smf',[0 0.25] MF4='Low(F)Hi(R)':'smf',[0 1.4] MF5='Low(F)Aver(R)':'smf',[0 1.2] MF6='Aver(F)Aver(R)':'smf',[0 0.3]
	<b>[Input2]</b> Name='faster' Range=[0 2] NumMFs=3 MF1='hight':'gaussmf',[0.4246 -1.11e-17] MF2='average':'gaussmf',[0.4246 1] MF3='low':'gaussmf',[0.4246 2]	
	<b>[Input3]</b> Name='robust' Range=[0 2] NumMFs=3 MF1='hight':'gaussmf',[0.4246 -1.11e-17] MF2='average':'gaussmf',[0.4246 1] MF3='low':'gaussmf',[0.4246 2]	

Далее описываются входные данные (в нашем случае входных сигнала три – ошибка регулирования, быстродействие и робастность). Для каждого входа задается диапазон [0 2] и количество кривых (графиков) регулирования (для ошибки – два, а для быстродействия и робастности – по три).

На основе выбранной кривой ПИД-регулирования определяются и задаются рамки установления каждого входного сигнала. Для формирования выходного сигнала необходимо определить диапазон требуемого сигнала [0 1] и определить основные типы установления (регулирования) сигнала, в зависимости от входных данных [4].

Создание правил, определяющих закон регулирования (рисунок 1), формируется в программе, где цифры первого столбца характеризуют ошибку (1 – низкая, 2 – высокая), цифры второго и третьего столбцов – быстродействие и робастность (1 – высокое, 2 – среднее, 3 – низкое значения), четвертый столбец – выбор соответствующей кривой выходного сигнала, пятый столбец – границы регулирования:

```

[Rules]
1 1 1, 1 (1) : 1 2 1 1, 1 (1) : 1
1 1 2, 2 (1) : 1 2 1 2, 2 (1) : 1
1 2 1, 3 (1) : 1 2 2 1, 3 (1) : 1
1 3 1, 4 (1) : 1 2 3 1, 4 (1) : 1
1 3 2, 5 (1) : 1 2 3 2, 5 (1) : 1
1 2 2, 6 (1) : 1 2 2 2, 6 (1) : 1
    
```

Рисунок 1 – Правила регулирования для системы с нечеткой логикой

Исследование системы «синхронный генератор + fuzzy-регулятор» проводилось во временных, частотных и импульсных областях при работе генератора на асинхронную, импульсно-периодическую, выпрямительную нагрузки.

Анализ свойств системы «синхронный генератор + fuzzy-регулятор» осуществлен по результатам имитационного моделирования в среде *Matlab* во временных, частотных и импульсных областях при работе генератора на асинхронную, импульсно-периодическую, выпрямительную нагрузки, при подаче на вход системы различных возмущений: ступенчатого (*step*), пульсирующего (*pulse generator*) и случайного (*random number*). Анализ свойств fuzzy-регулятора в сравнении с существующим аналоговым регулятором показал, что качество управления объектом у спроектированной системы лучше (время регулирования сокращено приблизительно в 2 раза: время отклика си-

стемы на дельта функцию уменьшилось в 1,35–1,52 раза: запас устойчивости системы по амплитуде и фазе увеличился в 0,75–2,1 раза: система обладает высокой робастностью - в реальной ситуации вывести систему с эталонной моделью на границу устойчивости практически невозможно).

#### Список литературы

- 1 **Маслолюбов, Ю. П.** Введение в Neural Network Toolbox [Электронный ресурс] / Ю. П. Маслолюбов. – Режим доступа : <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book1/index.php>. – Дата доступа: 26.05.2017.
- 2 **Терещенко, К. В.** Применение среды MATLAB/SIMULINK для оценки влияния характера нагрузки на характеристики синхронного генератора / К. В. Терещенко // Перші кроки в науку : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. студентів та молодих вчених. – Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. – С. 35–40.
- 3 **Васильев, Д.** Системы автоматического управления / Д. Васильев, В. Чуич. – Рига : Академическое издание Палмарий, 2012. – 200 с.
- 4 **Терещенко, К. В.** Исследование ПИД-регуляторов с использованием высокоуровневого интерпретируемого языка программирования Matlab R2016b / К. В. Терещенко // Научные разработки: перспективы XXI века : материалы V Международ. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, Краматорск, 19 апреля 2017 г. – Винниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. – С. 7–11.

УДК 539.3

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕЛ

*В. Г. КАРНАУХОВ, В. И. КОЗЛОВ, Л. П. ЗИНЧУК*  
*Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев*

Разнообразные конструктивные элементы из композитных пьезоэлектрических материалов широко используются в различных отраслях науки и техники. В процессе эксплуатации они могут находиться под действием продольных динамических нагрузок, что и обуславливает значительный интерес к проблемам параметрических колебаний таких элементов.

При изучении параметрических колебаний элементов конструкций основными вопросами являются построение областей динамической неустойчивости и исследования колебательных процессов в этих областях. Для решения первого вопроса используется линеаризованная теория, а для решения второго нужно исследовать теорию колебаний с учетом геометрической нелинейности.

В данной работе использована теория колебаний пространственных вязкоупругих пьезоэлектрических тел с учетом геометрической нелинейности. Эта теория является основой для построения линеаризованных моделей параметрических колебаний пространственных пьезоэлектрических тел. Такие модели используются для расчета областей динамической неустойчивости.

Рассматриваются параметрические колебания слоистых трехмерных тел из пьезоэлектрического вязкоупругого материала при воздействии на них гармонических во времени механической и электрической нагрузок. При этом основное внимание сосредоточено на исследовании главной области динамической неустойчивости, которая имеет наибольшее практическое значение.

Для расчета области динамической неустойчивости при параметрических колебаниях трехмерного тела сначала решалась задача электровязкоупругости, и вычислялись компоненты тензора начальных напряжений  $\sigma_{ij}^0$ . Затем решалась обобщенная задача на собственные значения (вычислялись собственные частоты и формы колебаний) и задача устойчивости рассматриваемого тела с начальными напряжениями  $\sigma_{ij}^0$  для определения критической нагрузки. Зная минимальную собственную частоту колебаний тела, критическое усилие и параметры возбуждающей нагрузки, можно построить главную область динамической неустойчивости. Эти задачи решаются с использованием метода конечных элементов [3]. Для этого с применением уравнений Лагранжа приведена вариационная формулировка задач электромеханики для трехмерных пьезоэлектрических тел с учетом предварительного деформирования.

Задача решается в декартовой системе координат, при этом ось  $oz$  выбирается в направлении силовых линий электрического поля предварительной поляризации. Линеаризованное вариационное уравнение можно представить в виде

$$\delta \mathbf{E} = \delta \mathbf{E}_L + \delta \mathbf{E}_{NL} = 0, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_L = & \frac{1}{2} \int_V \left[ c_{11} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2c_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + 2c_{13} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} + c_{11} \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2c_{13} \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} + c_{33} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + c_{66} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \right. \\ & + c_{44} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + c_{44} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - 2e_{13} E_z \frac{\partial u}{\partial x} - 2e_{13} E_z \frac{\partial v}{\partial y} - 2e_{33} E_z \frac{\partial w}{\partial z} - 2e_{15} E_x \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \\ & - 2e_{15} E_y \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \mu_{11} (E_x)^2 - \mu_{11} (E_y)^2 - \mu_{33} (E_z)^2 + 2\rho \left( \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} u + \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} v + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} w \right) + \\ & \left. + 2\zeta \left( \frac{\partial u}{\partial t} u + \frac{\partial v}{\partial t} v + \frac{\partial w}{\partial t} w \right) \right] dx dy dz - \int_{\Sigma} (P_{nx} u + P_{ny} v + P_{nz} w) d\Sigma, \\ \mathbf{E}_{NL} = & \frac{1}{2} \int_V \left\{ \sigma_x^0 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] + \sigma_y^0 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] + \right. \\ & + \sigma_z^0 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + 2\tau_{xy}^0 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \\ & \left. + 2\tau_{xz}^0 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\tau_{yz}^0 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} dx dy dz. \end{aligned}$$

В уравнении (1) используются стандартные обозначения [2, 3]. Для вычисления стационарных значений функционала  $\mathbf{E}$  применяется метод конечных элементов с квадратичной аппроксимацией компонент вектора перемещений и электрического потенциала в пределах четырехугольного изопараметрического элемента. Из условия стационарности функционала (1) в случае действия на рассматриваемое тело гармонических возмущающих сил  $P(t) = P_0 + P_1 \cos \Omega t$  получим матричное уравнение относительно вектора обобщенных перемещений  $\mathbf{u}$  вида

$$[\mathbf{M}] \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} + [\mathbf{C}] \frac{d\mathbf{u}}{dt} + [\mathbf{K}] \mathbf{u} - P_0 [\mathbf{G}] \mathbf{u} - P_1 \cos \Omega t [\mathbf{G}] \mathbf{u} = 0. \quad (2)$$

Здесь введены традиционные для метода конечных элементов обозначения:  $[\mathbf{M}]$  – матрица масс,  $[\mathbf{K}]$  – матрица жесткости,  $[\mathbf{C}]$  – матрица потерь,  $[\mathbf{G}]$  – матрица устойчивости, а  $P_0, P_1 = \text{const}$ ,  $\Omega$  – частота внешней периодической нагрузки.

Используя разложение  $\mathbf{u}$  по собственным функциям, рассматриваемая задача сводится в конечном итоге к решению уравнения Матье – Хилла

$$\frac{d^2 f_n(t)}{dt^2} + \omega_{n*}^2 (1 - 2\mu_{n*} \cos \Omega t) f_n(t) = 0, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где  $\omega_{n*}^2 = \omega_n^2 (1 - \zeta_n^2 / \omega_n^2)$ ,  $\mu_{n*} = \mu_n \omega_n^2 / (\omega_n^2 - \zeta_n^2)$ ,  $\mu_n = P_1 / [2(P_{n*} - P_0)]$ ,  $\omega_n$  –  $n$ -я собственная частота свободных колебаний,  $\zeta_n$  – коэффициент демпфирования и  $P_{n*}$  – критическая нагрузка для  $n$ -й моды колебаний. Для решения дифференциального уравнения (3) применяется метод гармонической линеаризации. Главные области динамической неустойчивости определяются согласно методике, изложенной в [1].

С использованием разработанного подхода при различных граничных условиях решены задачи для сплошной пластины из пьезоэлектрического вязкоупругого материала и трехслойной пластины, средний слой которой металлический, а внешние слои изготовлены из пьезоэлектрического вязкоупругого материала.

Проведено сравнение результатов расчетов главной области динамической неустойчивости с использованием предложенной методики и с применением классической теории Кирхгофа – Лява для тонкостенных элементов. Путем анализа числовых результатов исследовано влияние геометрических параметров, структурной неоднородности, механических и электрических граничных условий на главные области динамической неустойчивости.

#### Список литературы

- 1 Болотин, В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – М. : Гостехиздат, 1956. – 600 с.
- 2 Гринченко, В. Т. Электроупругость / В. Т. Гринченко, А. Ф. Улитко, Н. А. Шульга. – Киев : Наук. думка, 1989. – 280 с. – (Механика связанных полей в элементах конструкций: в 5 т.; т. 5).
- 3 Вынужденные резонансные колебания и диссипативный разогрев тел вращения из вязкоупругого пьезоэлектрического материала / В. Г. Карнаухов [и др.] // Прикладная механика. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 12–22.

УДК 539.3

### ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНАЯ КРУГОВАЯ ТРЕХСЛОЙНАЯ ПЛАСТИНА, СВОБОДНО ОПЕРТАЯ НА ОСНОВАНИЕ ПАСТЕРНАКА

*А. Г. КОЗЕЛ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*А. С. ОКОНЕЧНИКОВ*

*Московский авиационный институт, Российская Федерация*

За последние десятилетия значительно возрос интерес к применению тонкостенных конструкций, в том числе слоистых, во многих отраслях промышленности. В современном машиностроении и приборостроении не могут обойтись без применения композиционных материалов, обладающих значительным рядом преимуществ: сверхтвердость, сверхпрочность, стойкость при высоких температурах, сравнительно малый удельный вес по сравнению с традиционными конструкционными материалами (сталь, чугун, латунь, алюминий и т.п.). Отдельные задачи, связанные с пластинами и балками типа Тимошенко решены в работах [1–4]. Деформирование трехслойных элементов конструкций при учете температурного воздействия исследовалось в статьях [5–7], сжимаемости заполнителя – в статьях [8–10]. Деформирование упругих круговых трехслойных пластин на основании Пастернака рассматривалось в работе [12, 13]. Влияние физической нелинейности материалов слоев пластины на перемещения при жесткой заделке контура пластины исследовано в статьях [14, 15]. Здесь рассмотрена деформация подобной пластины при свободном опирании контура.

Для трехслойного пакета пластины приняты гипотезы ломаной линии. Во внешних несущих слоях несимметричной по толщине ( $h_1 \neq h_2$ ) трехслойной круговой пластины приняты гипотезы Кирхгофа. В жестком, достаточно толстом ( $h_3 = 2c$ ) заполнителе справедлива гипотеза о прямолинейности и несжимаемости деформированной нормали, которая поворачивается относительно срединной поверхности на дополнительный угол  $\psi(r)$ . Постановка задачи и ее решение проводится в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ . Срединная плоскость заполнителя принимается за координатную, ось  $z$  направлена перпендикулярно вверх, к первому слою. На верхний слой действует осесимметричная поперечная поверхностная нагрузка  $q = q(r)$ . Связь реакции основания  $q_R$ , действующей на нижнюю поверхность пластины, и прогиба принимается соответствующей модели Пастернака:

$$q_R(r) = -\kappa_0 w + t_f \Delta w,$$

где  $\kappa_0, t_f$  – коэффициенты сжатия и сдвига,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Система дифференциальных уравнений равновесия в усилиях, описывающая деформирование круговой упругой трехслойной пластины на упругом основании Пастернака была получена с помощью принципа Лагранжа в [12]. Поэтому ее можно применить и здесь как исходную.

Выделяя в обобщенных внутренних усилиях линейные и нелинейные составляющие и подставляя их выраженными через перемещения в уравнения равновесия, имеем:

$$\begin{aligned} L_2(a_1 u + a_2 \Psi - a_3 w_{,r}) &= p_\omega, \\ L_2(a_2 u + a_4 \Psi - a_5 w_{,r}) &= h_\omega, \\ L_3(a_3 u + a_5 \Psi - a_6 w_{,r}) - \kappa_0 w + t_f \Delta w &= -q + q_\omega, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, учитывающие упругие и геометрические параметры слоев,  $L_2, L_3$  – линейные дифференциальные операторы [12].

Здесь в левой части уравнений собраны линейные составляющие обобщённых внутренних усилий. Нелинейные добавки сосредоточены справа с нижним индексом « $\omega$ »:

$$\begin{aligned} p_\omega &= T_{r\omega, r} + \frac{1}{r}(T_{r\omega} - T_{\varphi\omega}), \quad h_\omega = H_{r\omega, r} + \frac{1}{r}(H_{r\omega} - H_{\varphi\omega}), \\ q_\omega &= M_{r\omega, rr} + \frac{1}{r}(2M_{r\omega, r} - M_{\varphi\omega, r}). \end{aligned}$$

Согласно методу упругих решений перепишем систему (1) в итерационном виде:

$$\begin{aligned} L_2(a_1 u^{(n)} + a_2 \Psi^{(n)} - a_3 w_{,r}^{(n)}) &= p_\omega^{(n-1)}, \\ L_2(a_2 u^{(n)} + a_4 \Psi^{(n)} - a_5 w_{,r}^{(n)}) &= h_\omega^{(n-1)}, \\ L_3(a_3 u^{(n)} + a_5 \Psi^{(n)} - a_6 w_{,r}^{(n)}) - \kappa_0 w^{(n)} + t_f \Delta w^{(n)} &= -q + q_\omega^{(n-1)}. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n$  – номер приближения.

Краевая задача по определению прогиба круглой физически нелинейной пластины на основании Пастернака замыкается присоединением граничных условий для случая свободного опирания контура пластины

$$\psi = 0, \quad T_r = 0, \quad M_r = 0, \quad Q = 0 \quad \text{при } r = R.$$

*Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T19PM-089).*

#### Список литературы

- 1 Вахтерова, Я. А. Обратная задача об идентификации нестационарной нагрузки для балки Тимошенко / Я. А. Вахтерова, Е. В. Серпичева, Г. В. Федотенков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 4. – С. 82–92.
- 2 Fedotenkov, G. V. Identification of non-stationary load upon Timoshenko beam / G. V. Fedotenkov, D. V. Tarlakovsky, Y. A. Vahterova // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – Vol. 40, no. 4. – P. 439–447.
- 3 Нестерович, А. В. Напряжения в круговой пластине типа Тимошенко при неосесимметричном растяжении-сжатии / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11 (11). – С. 195–203.
- 4 Нестерович, А. В. Уравнения равновесия трехслойной круговой пластины при неосесимметричном нагружении / А. В. Нестерович // Теоретическая и прикладная механика. – 2019. – Вып. 34. – С. 154–159.
- 5 Леоненко, Д. В. Колебания элементов авиационных конструкций, возбужденные тепловым воздействием / Д. В. Леоненко, Л. Н. Рабинский, Э. И. Старовойтов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2016. – № 4. – С. 25–32.
- 6 Starovoitov, É. I. Thermoelastic bending of a sandwich ring plate on an elastic foundation / É. I. Starovoitov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2008. – Vol. 44. – No. 9. – P. 1032–1040.
- 7 Старовойтов, Э. И. Термосиловое нагружение трехслойных пологих оболочек / Э. И. Старовойтов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1989. – № 5. – С. 114–119.
- 8 Захарчук, Ю. В. Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – № 10 (10). – С. 55–66.
- 9 Захарчук, Ю. В. Влияние сжимаемости наполнителя на перемещения в трёхслойной круговой симметричной пластине / Ю. В. Захарчук // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – № 2. – С. 14–27.
- 10 Зеленая, А. С. Деформирование упругой трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / А. С. Зеленая // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2017. – № 6 (105). – С. 89–95.
- 11 Леоненко, Д. В. Напряженно-деформированное состояние физически нелинейной трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / Д. В. Леоненко, А. С. Зеленая // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 2(43). – С. 77–82.
- 12 Старовойтов, Э. И. Влияние жесткости основания Пастернака на деформирование круговой трёхслойной пластины / Э. И. Старовойтов, А. Г. Козел // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 2. – С. 106–113.
- 13 Козел, А. Г. Влияние сдвиговой жесткости основания на напряжённое состояние сэндвич-пластины / А. Г. Козел // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 6 (332). – С. 25–35.
- 14 Козел, А. Г. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации : междунар. сб. науч. тр. – Гомель: БелГУТ, 2018. – Вып. 11. – С. 127–133.
- 15 Козел, А. Г. Деформирование физически нелинейной трехслойной пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации: междунар. сб. науч. тр. – Гомель: БелГУТ, 2019. – Вып. 12. – С. 105–112.



## **МЕТОДОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В АНИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

*Ек. Л. КУЗНЕЦОВА*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

На основе неявного метода градиентного спуска разработана методология численного решения обратных задач для уравнений параболического типа со смешанными дифференциальными операторами, с использованием как аналитических решений прямых задач, так и разработанных новых численных методов.

Рассмотрены вопросы сходимости итерационного метода неявного градиентного спуска для функционала в виде квадратичной невязки экспериментальных значений потенциала, в которые заложены искомые параметры, и расчетных значений потенциала.

Доказана теорема о единственности решения обратной коэффициентной задачи на основе аналитического решения двумерной нестационарной задачи переноса потенциала. При этом существование методологии заключается в линеаризации функционала невязки относительно приращений искомых параметров обратной задачи.

Предложенная методология использована для разработки алгоритма решения обратных коэффициентных задач переноса потенциала, с использованием аналитических решений прямых задач для определения линейных искомых параметров. При этом матрица коэффициентов чувствительности определялась путем непосредственного дифференцирования по искомым параметрам от прямой начально-краевой задачи на рассматриваемом интервале потенциала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МД-1798.2019.8.*

## **МЕТОДОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ТЕНЗОРА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НОВЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ**

*Ек. Л. КУЗНЕЦОВА, А. О. ШЕМЯКОВ*

*Московский авиационный институт (НИИ), г. Москва*

В работе на основе неявных градиентных методов минимизации функционалов невязки предложена методология численного решения обратных задач для уравнений параболического типа с тензорным характером переноса потенциала, которая до настоящего времени никак не освещена в литературе, но востребована наукой и практикой, особенно в проблемах диагностики реально протекающих процессов.

Для восстановления указанных компонентов предложена следующая методология:

1 На основе неявного метода градиентного спуска разработан алгоритм минимизации функционала невязки экспериментальных и расчетных значений температур в ограниченном числе пространственно-временных узлов.

2 Осуществлена линеаризация функционала невязки.

3 Построены матрицы чувствительности температур в выбранных пространственно-временных узлах, на основе которых построен итерационный алгоритм по определению приращений вектора искомых параметров.

4 Расчетные значения получены на основе нового экономичного абсолютно устойчивого метода переменных направлений с экстраполяцией численного решения задач для уравнений параболического типа со смешанными производными.

5 Доказана теорема о существовании и единственности решения обратной задачи теплопроводности в анизотропных телах, позволившая начинать итерационный процесс по значениям компонентов тензора теплопроводности, отличающихся от искомых в несколько раз.

Полученные результаты подтвердили эффективность предложенной методологии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента РФ МД-1798.2019.8, МК-3869.2019.8.*

## НАХОЖДЕНИЕ ЦЕНТРОИДОВ У СПЕЦИАЛЬНО ПОСТРОЕННЫХ НА $n$ -АРНОЙ ГРУППЕ ТРЕУГОЛЬНИКОВ

Ю. И. КУЛАЖЕНКО

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Начало построения элементов аффинной геометрии на тернарной группе восходит к работе Д. Вакарелова [1].

В [2] С. А. Русаков решил такую же задачу в случае  $n$ -арной группы  $G = \langle X, (\cdot), {}^{[-2]} \rangle$ .

В представленных исследованиях предлагается новый метод нахождения центроидов у специально построенных на полуабелевой  $n$ -арной группе  $A = \langle X, [ \cdot ], {}^{[-2]} \rangle$  треугольников  $A$ . В частности, рассмотрены случаи, когда треугольники  $n$ -арной группы строятся с помощью гомотетии с центром в одной из вершин произвольного треугольника  $\Delta abc$  и коэффициентами 2, 4 соответственно.

Используемые понятия и обозначения можно найти в [2, 3].

Приведем полученные результаты.

*Теорема.* Если  $a, b, c$  – произвольные элементы  $n$ -арной группы  $A$ , а элемент (точка)  $d \in A$  такой, что  $d\vec{a} + d\vec{b} + d\vec{c} = \vec{0}$ , т. е.  $d$  – центроид  $\Delta abc$ , то  $S_d(a)$  – центроид  $\Delta aS_b(a)S_c(a)$ , а  $S_{s_d(a)}(a)$  – центроид  $\Delta aS_{s_b(a)}(a)S_{s_c(a)}(a)$ , т. е. справедливы равенства  $\overline{S_{s_d(a)}(a)a} + \overline{S_{s_d(a)}(a)S_{s_b(a)}(a)} + \overline{S_{s_d(a)}(a)S_{s_c(a)}(a)} = \vec{0}$ ,  $\overline{S_{s_d(a)}(a)a} + \overline{S_{s_d(a)}(a)S_{s_b(a)}(a)} + \overline{S_{s_d(a)}(a)S_{s_c(a)}(a)} = \vec{0}$  соответственно.

### Список литературы

- 1 Вакарелов, Д. Тернарные группы / Д. Вакарелов // Годишник Софийского ун-та. Матфак. – 1966–1968. – Т. 61.– С. 71–105.
- 2 Русаков, С. А. Некоторые приложения теории  $n$ -арных групп / С. А. Русаков. – Минск : Беларуская навука, 1998. – 167 с.
- 3 Кулаженко, Ю. И. Полиадические операции и их приложения / Ю. И. Кулаженко. – Минск : Изд. Центр БГУ, 2014. – 311 с.

## О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДОВ ГАМИЛЬТОНОВОЙ МЕХАНИКИ К ДИНАМИЧЕСКИМ ЗАДАЧАМ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. С. КУРБАТОВ, А. А. ОРЕХОВ

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Линейные задачи динамики тонкостенных систем допускают исследование методами аналитической динамики, в том числе при высших степенях свободы и учете взаимодействия с окружающей средой численно-аналитическое количественное решение. В то же время прямое численное интегрирование жестких нелинейных уравнений движения тонкостенных элементов связано с неустойчивостью и ресурсоемкостью алгоритмов. В современной нелинейной динамике одним из основных методов исследования околорезонансных режимов является редукция модели, основанная на учете «ведущих» степеней свободы. Применение гамильтонова формализма к задачам о нелинейных колебаниях тонкостенных систем, несмотря на его эффективность и дополнительные возможности, предоставляемые методом Гамильтона – Якоби, носит эпизодический характер.

Рассмотрена модель нелинейных связанных колебаний неоднородной цилиндрической оболочки, учитывающая кинематические слагаемые до второго порядка.

На базе симплектической формулировки определены собственные значения и собственные функции соответствующей линеаризованной задачи, выполнен переход к каноническим переменным «действие – угол», и выявлены наборы параметров, при которых в задаче возникает явление «внутреннего резонанса».

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00938-а.*

## КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ИЗГИБА КРУГОВОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ СТУПЕНЧАТО-ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Д. В. ЛЕОНЕНКО

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Широкое применение трехслойных конструкций на транспорте обуславливает разработку методов их расчета. Деформирование трехслойных стержней под действием температуры и нейтронного потока рассмотрено в монографии [1]. Уже достаточно хорошо исследовано динамическое деформирование гладких круговых трехслойных пластин, в том числе на упругом основании. Так, в статье [2] рассмотрены свободные колебания, работа [3] посвящена исследованию резонансного нагружения круговых трехслойных пластин, а статья [4] – локального. Задачи об изгибе суживающихся анизотропных трехслойных пластин переменной толщины при действии поперечных нагрузок рассмотрены в [5]. В статье [6] исследован трехслойный стержень с нерегулярной границей. Здесь выполнена постановка задачи об осесимметричном изгибе круговой трехслойной пластины ступенчато-переменной толщины.

Пластина состоит из трех слоев различной толщины. Толщины несущих слоев могут изменяться вдоль радиуса ступенчато. Толщина заполнителя вдоль радиуса не изменяется. Во внешних несущих слоях принимаются гипотезы Кирхгофа, в заполнителе учитывается дополнительный сдвиг, для всего пакета принимается гипотеза ломаной нормали. На границах слоев перемещения непрерывны.

Через срединную плоскость заполнителя проходит цилиндрическая система координат  $r, \varphi, z$ . На внешнюю поверхность первого несущего слоя действует осесимметричная распределенная нагрузка  $q(r)$ . За искомые величины принимаются прогиб пластины  $w(r)$ , относительный сдвиг в заполнителе  $\psi(r)$  и радиальное перемещение координатной плоскости  $u(r)$ , которые не зависят от окружной координаты  $\varphi$ .

Уравнения равновесия пластины выводятся из вариационного принципа Лагранжа

$$\delta A = \delta W,$$

где  $\delta A$  – вариация суммарной работы внешних нагрузок  $q(r)$  и контурных усилий,  $\delta W$  – вариация работы внутренних сил упругости.

Получена система дифференциальных уравнений равновесия в усилиях, которая формально на каждом участке совпадает с системой для гладкой пластины [7].

### Список литературы

- 1 Старовойтов, Э. И. Трехслойные стержни в терморadiационных полях / Э. И. Старовойтов, М. А. Журавков, Д. В. Леоненко. – Минск : Беларуская наука, 2017. – 275 с.
- 2 Леоненко, Д. В. Свободные колебания круговых трехслойных пластин на упругом основании / Д. В. Леоненко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2008. – № 3. – С. 42–47.
- 3 Старовойтов, Э. И. Резонансные колебания круговых композитных пластин на упругом основании / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, Д. В. Тарлаковский // Механика композитных материалов. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 793–806.
- 4 Старовойтов, Э. И. Колебания круговых композитных пластин на упругом основании под действием локальных нагрузок / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко // Механика композитных материалов. – 2016. – Т. 52, № 5. – С. 943–954.
- 5 Jeon, J. S. Bending of tapered anisotropic sandwich plates with arbitrary edge conditions / J. S. Jeon, C. S. Hong // AIAA Journal. – 1992. – No. 7. – P. 1762–1769.
- 6 Плескачевский, Ю. М. Изгиб трехслойного стержня с нерегулярной границей / Ю. М. Плескачевский, Е. Э. Старовойтова // Механика машин, механизмов и материалов. – 2008. – № 3 (4). – С. 52–55.
- 7 Старовойтов, Э. И. Вязкоупругопластические слоистые пластины и оболочки / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2002. – 343 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Н. А. ЛОКТЕВА<sup>1,2</sup>, Д. О. СЕРДЮК<sup>1</sup>, П. Д. СКОПИНЦЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (НИИ),

<sup>2</sup>НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Российская Федерация

При создании новых безопасных или модернизации существующих конструкций, соответствующих необходимым высоким требованиям современного мира техники, необходимо особое внимание уделить исследованию процессов распространения нестационарных возмущений в конструк-

тивных элементах. Широко применяемым конструктивным элементом в таких отраслях промышленности, как машиностроение, судостроение, самолетостроение и ракетостроение, является оболочка.

Теоретический и прикладной интерес представляет собой исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек, находящихся под воздействием нестационарных ударных нагрузок, имитируемых импульсными функциями.

В трудах [1–2] исследуются вопросы нестационарной динамики изотропных пластин и оболочек. Задачи нестационарной динамики анизотропных пластин и оболочек освещены в работах [3–5].

Объектом исследования является тонкая неограниченная цилиндрическая оболочка. Оболочка имеет радиус  $R$  и толщину  $h$ . Материал цилиндрической оболочки принят упругим и анизотропным. При этом рассматривается случай анизотропии, при котором упругая среда имеет одну поверхность симметрии. В данном случае такой поверхностью является срединная поверхность оболочки. Для тонкой оболочки Кирхгофа – Лява рассматриваемый материал имеет шесть независимых упругих постоянных:

$$c_{11} = C^{1111}, c_{12} = C^{1122}, c_{16} = C^{1112}, c_{22} = C^{2222}, c_{26} = C^{1222}, c_{66} = C^{1212}.$$

В начальный момент времени оболочка находится в невозмущенном состоянии. Затем на нее воздействует нестационарная нагрузка  $P(\alpha, z, \tau)$ , распределенная по произвольной области  $D$ . Движение оболочки рассматривается в цилиндрической системе координат  $OR\alpha z$ .

Постановка задачи включает в себя уравнения движения упругой оболочки Кирхгофа – Лява, соответствующие геометрические и физические соотношения с учетом симметрии свойств материала исследуемой оболочки.

Уравнения движения в перемещениях анизотропной оболочки Кирхгофа – Лява имеют вид:

$$\begin{aligned} \rho h \frac{\partial^2 u_\alpha}{\partial t^2} &= K_{11}(u_\alpha) + K_{12}(u_z) + K_{13}(w) + q_\alpha, \\ \rho h \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} &= K_{11}(u_\alpha) + K_{12}(u_z) + K_{13}(w) + q_\alpha, \\ \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= K_{31}(u_\alpha) + K_{32}(u_z) + K_{33}(w) + P, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $K_{ij}$  – дифференциальные операторы,  $\rho$  – плотность материала оболочки,  $w$  – нормальное перемещение,  $u_\alpha, u_z$  – компоненты вектора тангенциальных перемещений,  $P$  – нормальное давление,  $q_i$  – тангенциальное давление.

Уравнения (1) совместно с начальными условиями

$$u_\alpha|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u_\alpha}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad u_z|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad w|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial t}|_{t=0} = 0,$$

образуют начальную задачу.

Цель исследования заключается в построении нестационарной функции нормальных перемещений  $w(\alpha, z, \tau)$  в ответ на воздействие нестационарной нагрузки  $P(\alpha, z, \tau)$ .

Метод исследования базируется на принципе суперпозиции, согласно которому прогиб оболочки  $w$  связан с воздействующим на неё нестационарным нормальным давлением  $P(\alpha, z, \tau)$  посредством трехмерных интегральных соотношений по времени, осевой и угловой координатам, ядром которой является нестационарная функция влияния  $G_w$  для анизотропной оболочки.

Для построения функции влияния  $G_w$  применяются разложения в экспоненциальные ряды Фурье, интегральное преобразование Лапласа по времени и интегральное преобразование Фурье по продольной координате. Обратное интегральное преобразование Лапласа выполняется аналитически, а оригинал интегрального преобразования Фурье находится с использованием численных методов интегрирования быстро осциллирующих функций.

Рассматриваем воздействие на оболочку распределенной в виде полосы нагрузки вида:

$$p(\alpha, z, \tau) = P(\tau) H(\tau) \left[ H\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - H\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) \right] \times \left[ H\left(z + \frac{b}{2}\right) - H\left(z - \frac{b}{2}\right) \right],$$

что соответствует приложению к боковой поверхности оболочки давления, распределенного по области  $D = \left\{ (\alpha, z) : -\frac{\beta}{2} \leq \alpha \leq \frac{\beta}{2}, -\frac{b}{2} \leq z \leq \frac{b}{2} \right\}$  и изменяющегося во времени по закону  $P(\tau)H(\tau)$ .  $H(\tau)$  – функция Хэвисайда.

Нестационарный нормальный прогиб цилиндрической оболочки представляется в виде тройной свертки функции влияния  $G_w$  с поверхностным давлением  $p(\alpha, z, \tau)$ . Интегралы свертки берутся при помощи квадратурных формул методом прямоугольников:

$$w(\alpha, z, \tau) \approx \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=1}^s \frac{\beta}{n} \cdot \frac{b}{m} \cdot \frac{\tau}{s} \cdot G_{wijk}(\alpha, z, \tau) p\left(\frac{\tau}{s}k\right),$$

$$G_{wijk}(\alpha, z, \tau) = G_w\left(\alpha - \frac{\beta}{n}i + \frac{\beta}{2}, z - \frac{b}{m}j + \frac{b}{2}, \tau - \frac{\tau}{s}k\right).$$
(2)

Соотношение (2) позволяет исследовать пространственно-временные распространения нестационарных колебаний в неограниченной оболочке Кирхгофа – Лява при воздействии распределенной по боковой области в виде полосы нестационарной нагрузки.

Представленный подход к построению нестационарной функции прогиба при переходе к размерным величинам открывает возможности для анализа нестационарного напряженно-деформированного состояния протяженных цилиндрических оболочек с учетом различных вариантов анизотропии материала и закона распределения нестационарной нагрузки как по координатам, так и по времени.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00968 А).*

#### Список литературы

- 1 Горшков, А. Г. Волны в сплошных средах / А. Г. Горшков [и др.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с.
- 2 **Tarlovskii, D. V.** Nonstationary 3D motion of an elastic spherical shell / D. V. Tarlovskii, G. V. Fedotenkov // *Mechanics of Solids*. – 2015. – Vol. 50, no. 2. – P. 208–2017. – DOI: 10.3103/S0025654415020107.
- 3 **Локтева, Н. А.** Нестационарная динамика тонких анизотропных упругих цилиндрических оболочек / Н. А. Локтева, Д. О. Сердюк, П. Д. Скопинцев // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVI Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. Т. 2.* – М. : ООО «ТРП», 2020.
- 4 **Сердюк, А. О.** Нестационарная динамика тонких ортотропных упругих пластин / А. О. Сердюк, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков // *Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы : тезисы докладов VII Междунар. науч. семинара.* – М. : ООО ТР-Принт, 2018. – С. 108–109.
- 5 **Сердюк, А. О.** Нестационарные функции влияния для анизотропной пластины типа Кирхгофа – Лява / А. О. Сердюк // *Ломоносовские чтения : тезисы докладов.* – М. : Изд-во Московского университета. – 2019. – С. 204–205.

УДК 539.37

## О ДЕФОРМИРОВАНИИ ТОРОИДАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ СУПЕРЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

*И. В. ЛУЦКАЯ, В. А. МАКСИМЮК*

*Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев*

Тороидальные оболочки благодаря своей компактности часто используются на транспорте как сосуды высокого давления. Стремление увеличить компактность привело к оболочкам некругового поперечного сечения. Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) таких оболочек численными сеточными методами усложняется из-за так называемого явления мембранного запираания (locking). Оно проявляется в замедленной, но устойчивой, сходимости классических численных методов вследствие значительных изгибов при небольших растяжениях. Особенно замедляется сходимость в случаях значительной эллиптичности поперечного сечения оболочек [1] вследствие больших изгибов близи полюсов эллипса. Очевидно, в случае суперэллиптического [2] сечения цилиндрических, тороидальных и других оболочек расчеты НДС еще больше усложняются.

Суперэллипс (superellipse, кривая Ламе) представляет собой плоскую кривую, задаваемую в декартовых координатах уравнением

$$\left| \frac{x}{a} \right|^n + \left| \frac{y}{b} \right|^n = 1, \quad n > 2. \quad (1)$$

При  $a = b = R$  кривая (1) становится суперокружностью (supercircle, squircle). С увеличением  $n$  суперэллипс будет приближаться к прямоугольнику с закругленными краями со сторонами  $a$  и  $b$ , а суперокружность – к квадрату со стороной  $R$ . Следует ожидать, что запирание в расчетах НДС таких оболочек проявится еще в большей степени.

Пусть срединная поверхность замкнутой тороидальной оболочки образована вращениями вокруг оси  $Oy$  суперэллипса (рисунок 1)

$$F(x, y) = \left| \frac{x-c}{a} \right|^n + \left| \frac{y}{b} \right|^n - 1 = 0, \quad (2)$$

где  $c$  – расстояние от центра поперечного сечения до оси вращения.

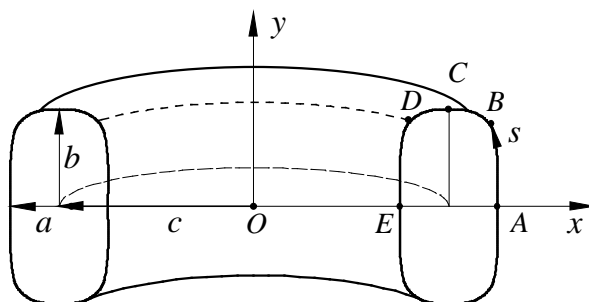


Рисунок 1 – Поперечное сечение замкнутой тороидальной оболочки

Срединная поверхность тонкой ортотропной оболочки отнесена [1] к криволинейной системе координат  $(s, \theta, \gamma)$ , в которой длина дуги суперокружности  $s$  отсчитывается от удаленной от оси вращения точки  $A$  ( $x = c + a, y = 0$ ) до ближайшей к ней точке  $E$  ( $x = c - a, y = 0$ ). Геометрические параметры оболочки толщиной  $h$  следующие:  $a/h = 100$ ,  $b/h = 110$ ,  $c/h = 200$ ,  $n = 4$ , длина половины дуги суперокружности  $s_k/h = 369$ . Оси ортотропии материала с характеристиками  $E_s = 15$  ГПа;  $E_\theta = 12$  ГПа;  $\nu_s = 0,12$  совпадают с координатными линиями принятой системы координат. Нагрузка – внутреннее давление  $p = 0,1$  МПа. В точках  $A$  и  $E$  задавались условия симметрии.

Осесимметричное НДС оболочки рассчитано методом конечных разностей. При проведении вычислений половина дуги суперэллипса разбивалась на ряд узловых точек с равномерным шагом при помощи алгоритма [3] численной дискретизации плоской кривой (1). В таблице 1 для характерных точек тора  $\tilde{s} = s/s_k$  приведены касательные перемещения  $\tilde{u} = u/h$  и прогибы  $\tilde{w} = w/h$  срединной поверхности, а также отнесенные к давлению  $p$  меридиональные ( $\sigma_s^+$ ,  $\sigma_s^-$ ) и окружные ( $\sigma_\theta^+$ ,  $\sigma_\theta^-$ ) напряжения на внешней (+) и внутренней (-) поверхностях оболочки.

Таблица 1 – Перемещения и напряжения в характерных точках тора, сечение – суперэллипс

Точка	$\tilde{s}$	$\tilde{u}$	$\tilde{w}$	$\sigma_s^+$	$\sigma_s^-$	$\sigma_\theta^+$	$\sigma_\theta^-$
A	0	0	0,728	101	64	300	298
B	0,35	1,719	1,762	-1393	1860	-680	-555
C	0,5	0,071	28,05	2869	-2235	221	-246
D	0,65	-1,126	-0,130	-1783	2528	640	1297
E	1,0	0	0,095	157	149	-100	-99

Для достижения точности до трех значащих цифр в максимальных величинах необходимо было разбить половину дуги суперэллипса ( $n = 4$ ) на 2000 узловых точек, тогда как в случае окружности ( $n = 2$ ) достаточно было 200 точек [3], что является проявлением мембранного запирания. Вблизи «диагональных» точек  $B$  и  $D$  суперэллипса ( $\tilde{s} = 0,35; 0,65$ ) и в «диаметральных» точках  $C$  ( $\tilde{s} = 0,5$ ) возникают значительные моменты. Максимальными являются меридиональные напряжения ( $\sigma_s^+$ ) на

внешней поверхности вблизи точки *C*. Там же имеет место максимальный изгиб. Вблизи «диагональных» точек *B* и *D*, в которых моменты достигают локальных максимумов, сечение разгибается.

Для сравнения в таблице 2 приведены аналогичные результаты для тора, поперечным сечением которого является суперокружность с параметрами:  $R/h = 100$ ,  $c/h = 200$ ,  $n = 4$ ,  $s_k/h = 351$ .

Таблица 2 – Перемещения и напряжения в характерных точках тора, сечение – суперокружность

Точка	$\tilde{s}$	$\tilde{y}$	$\tilde{w}$	$\sigma_s^+$	$\sigma_s^-$	$\sigma_\theta^+$	$\sigma_\theta^-$
<i>A</i>	0	0	0,727	106	58	300	297
<i>B</i>	0,35	1,731	-2,02	-1318	1674	-1152	-916
<i>C</i>	0,5	0,807	30,64	2997	-2332	227	-260
<i>D</i>	0,65	-1,174	1,370	-1803	2617	432	1202
<i>E</i>	1,0	0	0,095	159	148	-99	-99

Сравнительно небольшая ( $b/a = 1,1$ ) эллиптичность поперечного сечения ( $n = 4$ ) оболочки приводит (таблица 1) к незначительному перераспределению моментов вблизи «диагональных» точек. А максимальные напряжения (точка *C*) несколько уменьшаются, в отличие от случая простого ( $n = 4$ ) кругового и эллиптического сечений при прочих равных параметрах [3].

Данная осесимметричная задача может дополнить ряд так называемых патологических тестов.

#### Список литературы

- 1 **Lutskaya, I. V.** Modeling the Deformation of Orthotropic Toroidal Shells with Elliptical Cross-Section Based on Mixed Functionals / I. V. Lutskaya, V. A. Maksimyyuk, I. S. Chernyshenko // *Int. Appl. Mech.* – 2018. – Vol. 54, no. 6. – P. 660–665.
- 2 **Akgün, G.** Geometrically nonlinear transient analysis of laminated composite super-elliptic shell structures with generalized differential quadrature method / G. Akgün, H. Kurtaran // *Int. J. Non-Linear Mech.* – 2018. – Vol. 105. – P. 221–241.
- 3 **Chernyshenko, I. S.** On the Stress-Strain State of Toroidal Shells of Elliptical Cross Section Formed from Nonlinear Elastic Orthotropic Materials / I. S. Chernyshenko, V. A. Maksimyyuk // *Int. Appl. Mech.* – 2000. – Vol. 36, no. 1. – P. 90–97.

УДК 539.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПЛАСТИНЫ ИЗ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА С ВНУТРЕННИМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

*М. И. МАРТИРОСОВ, Д. В. ДЕДОВА*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

*А. В. ХОМЧЕНКО*

*ПАО «Корпорация «Иркут», г. Москва, Российская Федерация*

Механика разрушения полимерных композиционных материалов (ПКМ) достаточно сложна в силу анизотропии свойств монослоев, взаимного влияния напряжённо-деформированного состояния монослоев друг на друга, а также ввиду наличия повреждений.

Под повреждением будем понимать отклонение изделия от нормы, вызванное производством или эксплуатацией. Повреждение – нарушение исправного состояния изделия при сохранении его работоспособности. В авиации выделено пять категорий повреждений изделий из ПКМ в зависимости от требуемого уровня сохранения остаточной прочности, контролепригодности, интервала между осмотрами, условий появления повреждения, а также является или нет очевидным событием, вызывающее повреждение.

Категория 1: Допустимое повреждение (порог контролепригодности в условиях эксплуатации и производства) менее того, которое может быть обнаружено с вероятностью не менее 95 % в процессе эксплуатации и на стадии производства. Обоснование допустимости повреждения Категории 1 включает демонстрацию сохранения уровня прочности не ниже расчётной в течение всего жизненного цикла изделия.

Категория 2: Повреждение, которое можно обнаружить при плановых или целевых осмотрах (с вероятностью не менее 95 %), проводимых через установленные в эксплуатационной документации интервалы (при визуальном и инструментальном контроле). Обоснование допустимости повреждения Ка-

тегории 2 включает демонстрацию сохранения уровня прочности не ниже  $1,2 P_3$  ( $P_3$  – эксплуатационная нагрузка) в течение времени, необходимого для обнаружения этого повреждения. Основными источниками повреждений Категории 2 являются ударные повреждения различной природы.

Категория 3: Повреждение, которое может быть надёжно обнаружено в пределах нескольких полётов техническим персоналом (с вероятностью не менее 90 %). Обоснование допустимости повреждения Категории 3 включает демонстрацию сохранения прочности не ниже  $P_3$  в течение времени, необходимого для обнаружения этого повреждения.

Категория 4: Повреждение от дискретного источника при известном полётном событии. Обоснование прочности при повреждении Категории 4 включает демонстрацию остаточной прочности не ниже  $0,7P_3$ . К Категории 4 отнесён удар градины диаметром 64 мм с крейсерской скоростью полёта самолёта.

Категория 5: Серьёзное повреждение, вызванное аномальными наземными или полётными событиями, которое не входит в расчётные критерии или процедуры обоснования прочности конструкции. Единственным способом обеспечения безопасности конструкции самолёта от повреждений Категории 5 является немедленное сообщение о случившемся инциденте.

Все повреждения, снижающие прочность изделий из ПКМ в авиации до уровня ниже расчётной нагрузки, должны устраняться (ремонтироваться) по мере обнаружения, причем восстановление прочности до уровня расчётной нагрузки ремонтируемого изделия должно быть подтверждено расчётами и экспериментами.

В работе рассматривается пластина прямоугольной формы заданной геометрии из ПКМ при наличии системы расслоений эллиптической формы, произвольно расположенных между слоями пластины и имеющих различное соотношение осей. В качестве внешней нагрузки рассматриваются различные варианты действия статических нагрузок и нагрузок динамических, изменяющихся во времени по заданным законам.

Пластина выполнена в виде многослойной конструкции с симметричной укладкой монослоёв:  $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/+45^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$ , толщина монослоя равна 0,19 мм. Материал пластины – углепластик на основе препрега HexPly M21/34%/UD194/IMA-12K (углеродная лента IMA на основе высокопрочного волокна HexTow IMA-12K и эпоксидное модифицированное связующее M21) производства фирмы Hexcel Composites (США). Технология изготовления – автоклавная. Препрег представляет собой набор углеродных жгутов, собранных в ленту без утка. Лента пропитана связующим по технологии «Hot Melt», т. е. связующее в виде пленки совмещается с наполнителем с двух сторон и под давлением каландров при повышенной температуре сплавляется. Из такого материала в авиации могут изготавливаться изделия, входящие в перечень основных элементов (ОСЭ). ОСЭ – элементы основной силовой конструкции, которые воспринимают значительную долю полетных, наземных нагрузок и нагрузок от избыточного давления и разрушение которых может привести к аварийной или катастрофической ситуации. Так, например, в гражданской авиации из этого препрега могут производиться следующие детали: панели, лонжероны и нервюры центроплана; панели, лонжероны и нервюры консоли крыла; обшивки, лонжероны и нервюры стабилизатора и киля; балки пола и т. д.

Физико-механические характеристики монослоя известны. Эти характеристики являются паспортными и получены экспериментально по европейским стандартам EN производителем препрега для режима RTD (Room Temperature Dry): нормальная температура  $+23^\circ\text{C}$  и влажность – в состоянии поставки. Состояние поставки образцов – состояние, в котором находятся образцы сразу после изготовления, содержание влаги в которых не превышает 10 % от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85 %.

Слои пластины моделируются элементами со свойствами типа Composite в программном комплексе конечно-элементного анализа LS-DYNA (Lawrence Livermore National Laboratory). Все слои жестко сцеплены клеевым контактом, за исключением областей с повреждениями, в которых учитывается контактное взаимодействие. Граничные условия на границе соответствуют жесткому защемлению. Используется явная схема интегрирования полной системы уравнений метода конечных элементов (МКЭ).

Определяется поле индексов разрушения  $f$  (разрушение наступает при  $f = 1$ ) в различные моменты времени при наличии и отсутствии повреждений при действии статической и динамической нагрузок. Рассматриваются следующие критерии разрушения для ПКМ: maximum stress, maximum strain, Hill, Tsai-Wu, Tsai-Hill (Hill-Mises), Hankinson, Cowin, Hoffman, Puppo-Evensen, Norris, Fischer, Norris-McKinnon, DeAlia, Grant-Sanders, Puck, Hashin, Chang-Chang, Cuntze, LaRC (Langley Research Center).

Аналогичные расчеты были проведены и для однонаправленного углепластика на основе пре-



прега HexPly 8552/34%/UD134/AS4-12K (углеродная лента AS4 на основе углеродного волокна NewTow AS4-12K и эпоксидное модифицированное связующее 8552). В гражданской авиации из данного препрега могут изготавливаться средне- и слабонагруженные детали конструкционного назначения по автоклавной технологии: элементы механизации крыла и хвостового оперения; обтекатели закрылков; створки шасси; крышки люков центроплана и консоли крыла; обтекатели пилонов навески двигателя. Производитель – фирма Hexcel Composites (США).

Полученные численные результаты удовлетворительно совпадают с некоторыми имеющимися экспериментальными данными других авторов.

Предложенная методика численного моделирования поведения композитных пластин с учётом произвольно расположенных множественных межслоевых повреждений под действием статических и динамических нагрузок различного характера может быть использована при проектировании элементов конструкций из ПКМ для авиационной техники.

УДК 539.3

## **РАССЛОЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

*А. Л. МЕДВЕДСКИЙ*

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского,  
г. Жуковский, Российская Федерация*

*М. И. МАРТИРОСОВ*

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

*А. В. ХОМЧЕНКО*

*ПАО «Корпорация «Иркут», г. Москва, Российская Федерация*

Постоянное совершенствование конструкционных материалов является приоритетной задачей любой отрасли транспортного машиностроения. К таким материалам относятся полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые обладают рядом преимуществ: высокими жёсткостными и прочностными характеристиками, низкой удельной массой, высоким сопротивлением распространению трещин. В изделиях из ПКМ имеют место и недостатки: внутренние дефекты, которые могут возникать на различных этапах производства и эксплуатации. Дефекты, как правило, сопровождаются растрескиванием матрицы и разрушением волокон, что оказывает влияние на прочностные характеристики изделия.

В настоящей работе представлены результаты исследований динамики различных элементов конструкций с внутренними дефектами эллиптической формы типа расслоений под действием нестационарных нагрузок. Элементы конструкций выполнены из углепластиков на основе препрегов HexPly M21/34%/UD194/IMA (углелента с толщиной монослоя 0,19 мм) и HexPly M21/40%/285T2/AS4C (углеткань с толщиной монослоя 0,285 мм), предназначенных для производства изделий по автоклавной технологии. Упругие и прочностные характеристики известны, и получены экспериментально на образцах по европейским стандартам EN для режима RTD (Room Temperature Dry: нормальная температура +23 °С и влажность – в состоянии поставки; состояние поставки образцов – состояние, в котором находятся образцы сразу после изготовления, содержание влаги в которых не превышает 10 % от максимального влагонасыщения при относительной влажности 85 %).

Рассматриваемые элементы конструкций:

1 Прямоугольная пластина длиной  $a = 400$  мм, шириной  $b = 200$  мм со следующей схемой укладки:  $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/-45^\circ/+45^\circ]$ . Между слоями № 1–2, № 2–3 и т. д. до № 6–7 расположены дефекты (расслоения) в форме эллипса с осями 46 и 26 мм. Здесь и далее рассматриваются дефекты, расположенные один под другим. В качестве внешнего воздействия рассматривается поле равномерного давления, распределённого на поверхности пластины и изменяющегося по следующему закону:  $P(t) = p_0H(t)$ , где  $p_0 = 1,5$  МПа,  $H(t)$  – функция Хэвисайда.

2 Гладкая пологая панель с укладкой:  $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$ . Длина панели  $a = 340$  мм, ширина  $b = 140$  мм, стрела подъёма  $c = 4,9$  мм (наибольшее возвышение срединной поверхности незамкнутой оболочки над плоскостью опорного контура). Дефекты эллиптической формы с осями 34 и 24 мм расположены между всеми слоями. Рассматривается поле давления, действующее по закону:  $p(\varphi, t) = p_0 \cos^2 \varphi H(t) H\left(\frac{\pi}{2} - |\varphi|\right)$ , где  $p_0 = 1$  МПа, изменение угловой координаты  $\varphi$  происходит вдоль короткой кромки панели. Поле давления распределено по внешней поверхности панели.

3 Подкреплённая пологая цилиндрическая панель. Схема укладки:  $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$ . В качестве подкрепляющих элементов используются стрингеры Т-образного сечения (высота стенки 37 мм, суммарная ширина полок 61 мм). Длина панели  $a = 750$  мм, ширина  $b = 490$  мм, стрела подъёма  $c = 7,38$  мм. Дефекты расположены в обшивке в межстрингерной зоне (с осями 36 и 26 мм). В качестве нагрузки рассматривается взрывное воздействие (в соответствии с моделью Kingery-Bulmash) с энергией взрыва  $E = 209,2$  кДж и волной сферической формы. Эпицентр взрыва расположен на расстоянии 500 мм от внешней поверхности панели.

4 Цилиндрическая гладкая оболочка со следующей схемой укладки:  $[+45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s$ . Длина оболочки  $L = 800$  мм, радиус  $R = 200$  мм. На оболочку действуют взрывная волна сферической формы с энергией взрыва  $E = 418,4$  кДж. Эпицентр взрыва расположен на расстоянии 900 мм от внешней поверхности оболочки.

Задачи решаются численно с помощью программного комплекса LS-DYNA (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL). Каждый монослой моделируется отдельным набором конечных элементов (КЭ). Формулировка КЭ: «16: Fully integrated shell element», свойство – «COMPOSITE». Слои КЭ соединены между собой с помощью клеявого контакта: «AUTOMATIC\_ONE\_WAY\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK». Зоны дефектов взаимодействуют посредством контакта «AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE».

В результате решения определяются поля перемещений, напряжений и деформаций в слоях элементов конструкций в различные моменты времени. Для задач, в которых рассматривается действие взрывной волны определяется картина поля давления, действующего на внешнюю поверхность элемента конструкции, а также графики зависимости давления в характерных точках в различные моменты времени. На основе полей напряжений и деформаций определяются коэффициенты запаса прочности с помощью различных критериев разрушения для композитов (Hashin, Chang-Chang, Puck, LaRC), позволяющих оценивать разрушения матрицы и волокна отдельно друг от друга. Оценивается влияние расслоений на прочность рассматриваемых элементов конструкций путём сравнения распределения коэффициентов запаса прочности по рассматриваемым критериям разрушения и прогибов в различные моменты времени для случаев наличия и отсутствия дефектов между слоями.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-08-01153 А).*

УДК 539.3

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК СОГЛАСНО РАЗЛИЧНЫХ ТЕОРИЙ**

*В. Ф. МЕЙШ*

*Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев*

*Ю. А. МЕЙШ*

*Национальный транспортный университет, г. Киев, Украина*

*В. Ф. КОРНИЕНКО*

*Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев*

В работе представлены результаты расчетов динамического поведения трехслойных сферических оболочек согласно нескольких прикладных теорий: теории трехслойных сферических оболочек с привлечением независимых гипотез к каждому слою [1], теории оболочек с привлечением единых гипотез ко всему пакету слоев (модель С. П. Тимошенко и модель Кирхгофа – Лява).

В частности, уравнения колебаний трехслойных сферических оболочек с привлечением независимых гипотез относительно искомым перемещений  $u_1, u_2, u_3, u_4, w_1, w_3$  на поверхностях слоев имеют вид:

$$\begin{aligned}
L_{3m+1}(\bar{U}) &= \frac{\rho_{2m+1} h_{2m+1}}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_{2m+1} + u_{2m+2}}{2} \right) + (-1)^{m+1} \frac{\rho_{2m+1} h_{2m+1}^2}{12} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_{2m+2} - u_{2m+1}}{h_{2m+1}} \right), \quad m = 0, 1, \\
L_3(\bar{U}) &= \frac{\rho_{fil}(s) h_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_1 + u_2}{2} \right) - \frac{\rho_1 h_1^2}{12} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_2 - u_1}{h_1} \right) + \frac{\rho_{fil}(s) h_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_3 + u_2}{2} \right) + \frac{\rho_{fil}(s) h_2^2}{12} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_3 - u_2}{h_2} \right), \\
L_4(\bar{U}) &= \frac{\rho_3 h_3}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_2 + u_3}{2} \right) + \frac{\rho_{fil}(s) h_2^2}{12} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_3 - u_2}{h_2} \right) - \frac{\rho_3 h_3}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_4 + u_3}{2} \right) + \frac{\rho_3 h_3^2}{12} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{u_4 - u_3}{h_3} \right), \\
L_{m+5}(\bar{U}) &= \rho_{2m+1} h_{2m+1} \frac{\partial^2}{\partial t^2} w_{2m+1} + \frac{\rho_{fil}(s) h_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{w_1 + w_3}{2} \right) + (-1)^{m+1} \frac{\rho_{fil}(s) h_2^2}{12} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{w_3 - w_1}{h_2} \right), \quad (m = 0; 1),
\end{aligned} \tag{1}$$

где операторы  $L_m(\bar{U})$ ,  $m = \overline{1, 6}$  отвечают за левую часть исходных уравнений колебаний. В случае свободного отверстия при  $\alpha_0$  и  $\alpha_N$  граничные условия записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2} T_{11}^{2m-1} - (-1)^n \frac{M_{11}^{2m-1}}{h_{2m-1}} &= 0, \\
\frac{1}{2} T_{11}^m + \frac{M_{11}^m}{h_m} + \frac{1}{2} T_{11}^{m+1} - \frac{M_{11}^{m+1}}{h_{m+1}} &= 0, \\
\bar{T}_{13}^{2m+1} + \frac{1}{2} \bar{T}_{13}^2 &= 0, \quad m = 1, 2.
\end{aligned} \tag{2}$$

Уравнения колебаний (1) дополняются нулевыми начальными условиями для компонентов вектора перемещений.

Алгоритм расчетов основывается на применении интегро-интерполяционного метода построения разностных схем по пространственной координате и явной конечно-разностной аппроксимации по временной координате [2].

Расчеты проводились для сферических оболочек, ослабленных двумя симметричными отверстиями радиуса  $r_0 = R \sin \alpha_0$ ,  $\alpha_0 = \pi / 12$ . Рассматривались случаи свободного края отверстий при  $\alpha_0 = \pi / 12$  и  $\alpha_N = \pi - \alpha_0$  (для уравнений (1) – граничные условия вида (2)). Внутренняя нормальная распределенная нагрузка  $P_3(t)$  задавалась в виде

$$P_3(t) = A \cdot \sin \frac{\pi t}{T} [\eta(t) - \eta(t - T)],$$

где  $T$  – длительность нагрузки ( $T = 50 \cdot 10^{-6}$  с),  $A$  – амплитуда нагрузки  $A = 10^6$  Па,  $\eta(t)$  – функция Хевисайда.

Сравнительный анализ результатов приводился по величинам прогиба  $u_3$  и напряжения  $\sigma_{22}$  в заполнителе и обшивках. При величинах  $E_1 / E_{fil} = 10$  результаты расчетов практически не отличаются. Разница начинает сказываться при  $E_1 / E_{fil} = 100$ . При этом разница по величинам прогиба порядка 5 %. Наиболее характерные различия наблюдаются для случая  $E_1 / E_{fil} = 1000$ . Сравнение результатов проводилось в момент достижения максимального значения прогиба на исследованном интервале времени. Как показали расчеты, разница по максимальным амплитудам прогибов достигает порядка 10 %, причем максимальные значения достигаются в области отверстий. Следует отметить и качественные различия для величины  $u_3$ . Согласно теории независимых аппроксимаций величинам прогибов  $u_3$  присуще более густое волнообразование. Максимальные значения величин

$\sigma_{22}$  по рассматриваемым теориям достигаются не одновременно согласно уравнений (1)  $t = 6T$ , а согласно теории пакета –  $t = 7T$ . При этом, максимальные величины  $\sigma_{22}$  по теории с привлечением независимых гипотез к каждому слою отличаются от соответствующих значений по теории пакета в 3,5 раза. Качественный характер изменения величины  $\sigma_{22}$  (процесс волнообразования) аналогичен поведению величин прогиба. Расчеты в рамках неоднородных оболочек по теории Кирхгофа – Лява для рассматриваемых задач количественно и качественно на исследуемом интервале времени совпадают с результатами согласно теории типа С. П. Тимошенко. В некоторые моменты времени наблюдается разница по величинам  $u_3$  и  $\sigma_{22}$  в пределах 7–10 %, но максимальные значения этих величин в обшивках и заполнителе совпадают.

#### Список литературы

1 Мейш, В. Ф. Сравнительный анализ динамического поведения трехслойных оболочек в рамках прикладных теорий при нестационарных нагружениях / В. Ф. Мейш, Ю. А. Хамренко // Прикладная механика. – 2003. – Т. 39, № 7. – С. 123–130.

2 Головкин, К. Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках: монография / К. Г. Головкин, П. З. Луговой, В. Ф. Мейш ; под ред. акад. НАН Украины А. Н. Гузя. – Киев : Изд.-полигр. центр «Киевский ун-т», 2012. – 541 с.

УДК 539.3+ 625.8

### РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ПОКРЫТИИ

*В. В. МОЖАРОВСКИЙ, Д. С. КУЗЬМЕНКОВ*

*Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Республика Беларусь*

*В. А. КУКАРЕКО*

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск*

На современном этапе развития машиностроения актуальными задачами является создания новых термостабильных износостойких слоев с градиентной структурой на основе нитридов железа и хрома, а также разработка и создание новых математических моделей расчета напряженного состояния и температуры в покрытиях и основаниях.

Следует отметить, что актуальной научной и практической задачей современного материаловедения является применения новых технологий для упрочнения поверхностного слоя посредством осаждения нитридов, либо диффузионном модифицировании, а также изучение упругих, прочностных и дюрометрических свойств тонких ионно-плазменных покрытий. Как отмечено в работе [1], «покрытия, полученные методом термического напыления, может существенно способствовать уменьшению скорости изнашивания в условиях широкого диапазона скоростей скольжения и различных значений температуры», поэтому поставленная задача является весьма актуальной. В современных исследованиях [2] представлен анализ методик конечных элементов (МКЭ), были проведены опыты определения напряжений и деформаций в модельных образцах в условиях контактного давления и теплового состояния. Ключевой задачей для разработки и создания математической модели расчета напряжений и температур в упругих покрытиях является определение их модулей упругости и решения проблемы упругости тонких покрытий. Известно, что составной частью физической модели и математического описания температурного поля в покрытии и основании, применительно для расчета слоев с градиентной структурой на основе нитридов железа и хрома, является математическая модель полосы (покрытия) и основания. При исследованиях следует учесть влияние температуры (рисунки 1). Так, результаты триботехнических испытаний стали, в процессе трения образцов стали с упрочненным слоем, обработанной ионами азота при 770 К и обладающей наибольшей глубиной азотированного слоя, показали, что сталь обладает высокой износостойкостью. Для более детального изучения этой задачи будем рассматривать теорию расчета термического и контактного взаимодействия.

Рассмотрим реализацию задачи об определении температуры для случая композитного покрытия жестко скрепленного с упругим композитным основанием (подложкой). Пусть на поверхности

задана температура (частный случай, сосредоточенная температура обобщается для произвольного распределения температуры)

$$T_2(x, -h) = T_0 \delta(x - x_0),$$

и необходимо определить температурное поле как в покрытии, так и основании. Реализацию решения задачи будем осуществлять из позиций теории упругости анизотропного тела на основе работ [2–6].

Для рассматриваемой среды необходимо решить уравнения теплопроводности

$$k_{11}^{(m)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + 2k_{12}^{(m)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial x \partial y} + k_{22}^{(m)} \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} = 0, \quad m = 1, 2$$

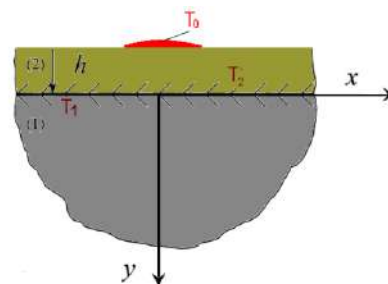


Рисунок 1 – Расчетная схема определения температуры в покрытии

при условии равенства температур и тепловых потоков на границе раздела материалов. Решается задача с помощью преобразования Фурье. Следует отметить, что оригинальный способ решения был предложен в работе [3].

В окончательном варианте приближенное решения [3], представляющее формулы в виде рядов, будет иметь следующий вид:

– для основания

$$T_1 = \frac{2T_0}{\pi} \frac{1}{\eta+1} \sum_0^{\infty} \left( \frac{\eta-1}{\eta+1} \right)^n \frac{|q_2^{(1)} y + (2n+1)q_2^{(2)} h|}{[(x-x_0) + (q_1^{(1)} y + q_1^{(2)} h)]^2 + [q_2^{(1)} y + (2n+1)q_2^{(2)} h]^2},$$

– для покрытия

$$T_2 = \frac{T_0}{\pi} \left\{ \sum_0^{\infty} \left( \frac{\eta-1}{\eta+1} \right)^n \frac{|q_2^{(2)} [y + (2n+1)h]|}{[(x-x_0) + q_1^{(2)} (y+h)]^2 + [q_2^{(2)} (y + (2n+1)h)]^2}, \right.$$

$$\left. q_1 = -\frac{k_{12}}{k_{22}}, \quad q_2 = \frac{\sqrt{k_{11}k_{22} - k_{12}^2}}{k_{22}}, \quad c = \frac{k_{11}k_{22} - k_{12}^2}{k_{22}^2}, \quad \eta = \frac{k_{22}^{(1)} q_2^{(1)}}{k_{22}^{(2)} q_2^{(2)}}, \right.$$

где введены следующие обозначения;  $k_{ij}$  – коэффициенты теплопроводности материалов,  $i, j = 1, 2$ .

В настоящее время разрабатывается компьютерная программа расчета температур и их распределения, как в покрытии, так и основании для различных материалов. Рассматриваются частные случаи, когда покрытие и основание изотропные, а также другие сочетания тепловых свойств материалов. Дополнительно предложен алгоритм расчета тепловых потоков.

*Работа выполнена при поддержке БРФФИ, задание № T20YKA – 012.*

#### Список литературы

- 1 **Cholakova, T. M.** Effect of the heat treatment on mechanical and structural properties of CrTiAlN coatings deposited at low temperature / T. M. Cholakova, L. P. Kolaklieva, R. D. Kakanakov // Bulgarian Chemical Communications. – Special Issue G. – 2018. – Vol. 50. – P. 197–204.
- 2 **Jabłoński, P.** Structural FEM analysis of thermal sprayed coatings under conditions of contact pressure and high temperature / P. Jabłoński, P. Czajka // Poznan University of Technology, Institute of Mechanical Technology Conference Paper. – 2017. – P. 40–47.
- 3 **Hsieh, Ming-Hsien.** Analytical investigations for heat conduction problems in anisotropic thin-layer media with embedded heat sources / Ming-Hsien Hsieh, Chien-Ching Ma // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45. – P. 4117–4132.
- 4 **Можаровский, В. В.** О расчете напряженного состояния покрытий из функционально-градиентных и термочувствительных материалов / В. В. Можаровский, Е. М. Березовская // Известия ГГУ им. Ф. Скорины, Гомель. – 2014. – № 3 (84). – С. 86–92.
- 5 **Прусов, И. А.** Термоупругие анизотропные пластинки / И. А. Прусов. – Минск : БГУ, 1978. – 200 с.
- 6 **Можаровский, В. В.** Прикладная механика слоистых тел из композитов / В. В. Можаровский, В. Е. Старжинский. – Минск : Наука, 1988. – 280 с.
- 7 **Можаровский, В. В.** Плоские контактные задачи для анизотропных покрытий с учетом трения / В. В. Можаровский // Трение и износ. – 1992. – Т.13, № 5. – С. 825–836.

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ СО СВОБОДНЫМ КОНТУРОМ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ В СВОЕЙ ПЛОСКОСТИ

А. В. НЕСТЕРОВИЧ

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

**Введение.** В настоящее время в различных отраслях промышленности широко применяются многослойные конструкции, исследованию НДС которых посвящены многочисленные работы. Квазистатические нагружения многослойных элементов конструкций опубликованы в [1–3]. Деформирование круговых и кольцевых трехслойных пластин с учетом опирания на различные основания приведены в [4–6]. Влияние сжимаемости на прямоугольные и круглые пластины представлены в [7–10].

Рассматривается осесимметричное изотермическое деформирование трехслойной круговой пластины в своей плоскости со свободно опертым контуром, для которой принимаются кинематические гипотезы ломаной линии. Постановка задачи и ее решение проводятся в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ , связанной со срединной плоскостью заполнителя. К срединной плоскости заполнителя приложена непрерывно распределенная нагрузка, проекции которой на оси координат:  $p_r(r), p_\varphi(r)$ .

На пластину действует растягивающая (сжимающая) нагрузка с постоянной амплитудой  $p_{r0} = \text{const}$ :

$$p_r(r) = p_{r0}, \quad p_\varphi = 0. \quad (1)$$

Соответствующие уравнения равновесия в перемещениях получены с помощью принципа возможных перемещений Лагранжа:

$$\begin{aligned} L_2(u_r) &\equiv u_{r,rr} + \frac{u_{r,r}}{r} - \frac{u_r}{r^2} = -\frac{1}{a_1} p_r, \\ L_2(u_\varphi) &\equiv u_{\varphi,rr} + \frac{u_{\varphi,r}}{r} - \frac{u_\varphi}{r^2} = -\frac{1}{a_2} p_\varphi, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $L_2$  – оператор Бесселя;  $a_i$  – коэффициенты, зависящие от температуры и определяемые через геометрические и упругие характеристики материалов слоев; запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования.

Решение системы (2) получено методом прямого интегрирования с учетом (1):

$$u_r = C_1 r + \frac{C_2}{r} - \frac{1}{a_1 r} \int_0^r \int_0^r p_r \, dr \, dr.$$

Для определения констант интегрирования при свободном опирании контура пластины используем граничное условие в усилиях

$$T_{rr}|_{r=r_0} = a_1 u_{r,rr} + \frac{a_2}{r} u_r - 3 \sum_{k=1}^3 \Delta T \alpha_0^{(k)} K_k h_k = 0. \quad (3)$$

Подставив решение (2) в (3) и учитывая ограниченность решения в начале координат, получим

$$C_2 = 0; \quad a_1 \left( C_1 - \frac{2}{3a_1} p_{r0} r_0 \right) + \frac{a_2}{r_0} \left( C_1 r_0 - \frac{1}{3a_1} p_{r0} r_0^2 \right) - 3 \sum_{k=1}^3 \alpha_0^{(k)} K_k \Delta T h_k = 0.$$

Отсюда

$$C_1 = \frac{1}{a_1 + a_2} \left( \frac{2a_1 + a_2}{3a_1} p_{r0} r_0 + 3 \sum_{k=1}^3 \alpha_0^{(k)} K_k \Delta T h_k \right).$$

Окончательно, радиальные перемещения принимают вид

$$u_r = \frac{1}{a_1 + a_2} \left( \left( \frac{2a_1 + a_2}{3a_1} r_0 - \frac{a_1 + a_2}{3a_1} r \right) p_{r0} + 3 \sum_{k=1}^3 \alpha_0^{(k)} K_k \Delta T h_k \right) r.$$

*Численная апробация* проведена при радиальной косинусоидальной нагрузке с постоянной амплитудой  $p_{r0} = 50$  МПа для трехслойной термоупругой пластины, выполненной из материалов Д16-Т–фторопласта-4–Д16-Т. Все перемещения и линейные размеры пластины отнесены к ее ради-

усу  $r_0$ . Относительные толщины слоев принимались  $h_1 = 0,02$ ,  $h_2 = 0,04$ ,  $h_3 = 2c$ ,  $c = 0,2$ . Распределение температуры по толщине слоев предполагается равномерным.

Рисунок 1 отображает изменение радиальных перемещений  $u_r$  вдоль радиуса пластины при постоянной нагрузке. Кривые соответствуют температурам: 1 –  $T = 293$  К; 2 –  $T = 303$  К; 3 –  $T = 323$  К. Перемещения достигают максимума на контуре пластины, в центре – равны нулю. При нагреве на 10 К радиальные перемещения увеличиваются в 1,23 раза, при нагреве на 30 К – в 1,69 раза. Влияние температуры на деформирование пластины незначительно.

**Выводы.** Предложенная модель позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние упругих трехслойных пластин при осесимметричном деформировании в своей плоскости.

*Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № Т19РМ-089).*

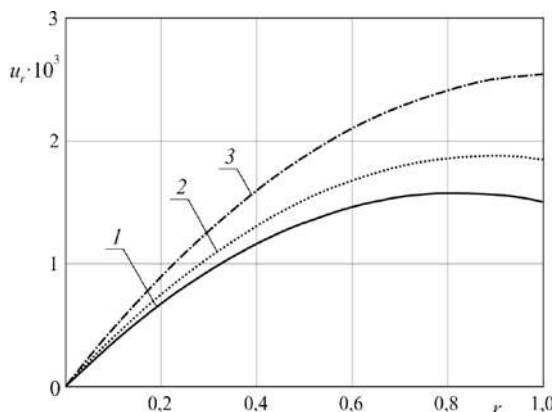


Рисунок 1 – Изменение радиальных перемещений  $u_r$  вдоль радиуса пластины

#### Список литературы

- 1 Старовойтов, Э. И. Деформирование упругого трехслойного стержня локальными нагрузками / Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая, Д. В. Леоненко // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2001. – № 4. – С. 37–40.
- 2 Нестерович, А. В. Напряженное состояние круговой трехслойной пластины при осесимметричном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – Вып. 12. – С. 152–157.
- 3 Нестерович, А. В. Деформирование трехслойной круговой пластины при косинусоидальном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 1 (42). – С. 85–90.
- 4 Starovoitov, É. I. Thermoelastic bending of a sandwich ring plate on an elastic foundation / É. I. Starovoitov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2008. – Vol. 44, no. 9. – P. 1032–1040.
- 5 Козел, А. Г. Деформирование круговой трёхслойной пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика. – 2017. – Вып. 32. – С. 235–240.
- 6 Козел, А. Г. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – Вып. 11. – С. 127–133.
- 7 Леоненко, Д. В. Напряженно-деформированное состояние физически нелинейной трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / Д. В. Леоненко, А. С. Зеленая // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 2(43). – С. 77–82.
- 8 Зеленая, А. С. Деформирование упругой трехслойной прямоугольной пластины со сжимаемым наполнителем / А. С. Зеленая // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2017. – № 6(105). – С. 89–95.
- 9 Захарчук, Ю. В. Влияние сжимаемости наполнителя на перемещения в трехслойной круговой симметричной пластине / Ю. В. Захарчук // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – № 2. – С. 14–27.
- 10 Захарчук, Ю. В. Деформирование круговой трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 4 (33). – С. 53–57.

УДК 539.3

### МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В. А. ПОГОДИН, Л. Н. РАБИНСКИЙ, С. А. СИТНИКОВ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

*В. К. АБГАРЯН, В. В. НИГМАТЗЯНОВ*  
*НИИ Прикладной механики и электродинамики МАИ, г. Москва, Российская Федерация*

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) используются в космической технике для стабилизации и коррекции орбит геостационарных спутников, а также в качестве маршевых двигателей космических летательных аппаратов в нескольких межпланетных миссиях. В одной из схем ЭРД – высокочастотном ионном двигателе (ВЧИД) – образование плазмы рабочего газа происходит под воздействием высокочастотного электромагнитного поля внутри тонкостенной чаши керамической газоразрядной камеры (ГРК). Для увеличения мощности ВЧИД необходимо увеличивать диаметр ГРК до значения 500 мм и выше при сохранении толщины стенки на прежнем уровне (не толще 4–5 мм). Применяемые керамиче-

ские образцы ГРК отличаются низкой стойкостью к вибрационным нагрузкам, возникающим при выводе КА на околоземную орбиту. Решением этой проблемы стало изготовление ГРК из композиционного материала на кремнийорганическом связующем. Матрица таких материалов может быть изготовлена из силиконовых эластомеров. В качестве дисперсионного наполнителя можно использовать мелкодисперсные порошки таких неорганических материалов, как оксиды алюминия, бериллия или кремния, нитриды бора или кремния и т. д. К недостаткам этого материала относится его низкая рабочая температура (до +270 °С). Так как проведение непосредственных измерений температуры внутри работающего ВЧИД является сложной технической задачей, то большой практический интерес представляет моделирование физико-химических процессов, протекающих при работе ВЧИД, и, в том числе, численные расчеты температур элементов конструкции и, в частности, ГРК с целью определения пригодности того или иного материала на необходимом режиме работы двигателя.

Численные расчеты температур в ВЧИД-10 с ГРК, изготовленной из полимер-керамического композиционного материала системы нитрид кремния (дисперсный наполнитель) – кремнийорганический каучук типа СКТВ (матрица) проводились с использованием программного комплекса ANSYS [1], в котором используется метод разбиения объекта на большое количество элементов. В данных расчетах число элементов сетки разбиения ВЧИД составило  $\sim 10^5$ .

Плазмофизические процессы, протекающие в разряде, приводят к выпадению ионов, электронов и фотонов из плазмы на поверхности ГРК и электродов ионно-оптической системы. Предполагается, что приносимая компонентами плазмы мощность поглощается элементами двигателя, граничащими с плазмой, в виде тепла. Также в индукторе и других проводящих элементах конструкции ВЧИД предположительно выделяется тепло вследствие протекающих в них вихревых токов, индуцируемых высокочастотным электромагнитным полем. Образующиеся тепловые потоки использовались в численном расчете в качестве граничных условий II рода. Выражения для расчёта тепловых потоков в ВЧИД приведены в [2, 3].

Была успешно проведена серия расчетов температурных полей в ВЧИД – 10 с диаметром основания цилиндрической ГРК, равным 100 мм, при значениях ионного тока от 0,1 и 0,2 А, что соответствовало мощностям ВЧИД 100 и 200 Вт. Максимальные, минимальные и средние температуры на поверхности ГРК при значениях ионного тока 0,2 А составили 250, 170 и 220 °С соответственно, что находится в пределах допустимых значений температур работы матрицы композита – кремнийорганического каучука. В перспективе планируется проведение численных расчетов и экспериментов с различными составами компаундов для ГРК для выявления предельных режимов работы ВЧИД при их использовании.

*Работа выполнена в Московском авиационном институте при финансовой поддержке РФФИ проект № 18-29-18083/18.*

#### Список литературы

- 1 ANSYS [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа : [www.ansys.com](http://www.ansys.com). – Дата доступа : 28.09.2020.
- 2 **Абгарян, В. К.** Тепловая модель высокочастотных ионных двигателей и источников ионов / В. К. Абгарян, К. И. Круглов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2015. – № 11. – С. 21–27.
- 3 **Abgaryan, V. K.** Ion-Electron Recombination and Heat Fluxes in High-Frequency Ion Sources / V. K. Abgaryan, A. A. Semenov // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2018. – Vol. 12. – No. 5. – P. 1022–1031.

УДК 593.3

## ПОЛИМЕРНЫЕ ПРЕКУРСОРЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*В. А. ПОГОДИН, Л. Н. РАБИНСКИЙ, С. А. СИТНИКОВ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

*В. В. НИГМАТЗЯНОВ*  
*НИИ Прикладной механики и электродинамики МАИ, г. Москва, Российская Федерация*

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) широко используются в космической технике. Стабилизация, коррекция геостационарных спутников, осуществляется за счет ЭРД [1]. Работа двигателя заключается в генерации плазмы рабочего тела (ксенона) в объеме камеры и ускорения продуктов ионизации электромагнитным полем ВЧ-генератора. Основными требованиями к материалу камеры являются: электромагнитная проницаемость в мегагерцовом диапазоне, виброустойчивость не менее 150 Дб, термостойкость до 600 °С [2].



Для снижения массы камеры и повышения рабочих характеристик ЭРД был предложен композиционный материал на основе кремнийорганической полимерной матрицы с наполнителем из порошка нитрида кремния, полученного в СВС процессе и тканого материала на основе кварцевого волокна.

Исходный полимер получали частичным согидролизом тетраметоксисилана, метилтриметоксисилана, винилтриметилксилана и  $\gamma$ -аминопропилтриметоксисилана [3]. Кремнийорганическая смола использовалась в виде 55 % мас. раствора в ацетонитриле, с средневязкостной молекулярной массой 2700–3500 г/моль. В качестве армирующего наполнителя использовали материал марки ТС-8/3-К производства НПО «Стеклопластик».

По данным ДСК/ТГА, теплостойкость полученного композиционного материала, наполненного  $\text{Si}_3\text{N}_4$  60 % мас., составила 400 °С. В зависимости от доли нитрида кремния, потеря массы пропорционально снижается. В процессе пиролиза при 800 °С, образуется аморфная оксинитридная фаза, это связано с гидролизом наполнителя нитрида кремния и выделением аммиака, что было экспериментально установлено. Несмотря на потерю гибкости, свойственную эластомерам, камера из данного материала, в составе ЭРД, сохранила рабочие характеристики на испытательном стенде.

Полученный композиционный материал, характеризуется следующими свойствами:

- твердость по Шору –85–90 (шкала D);
- плотность –1,65–1,67 г/см<sup>3</sup>;
- напряжение на разрыв при растяжении – по основе ткани 1000 кгс;
- напряжение на разрыв при растяжении – по утку 550 кгс;
- объемная усадка после отверждения – 3–4 %;
- температурный коэффициент линейного расширения –  $1,0 \dots 1,1 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ ;
- электрическая прочность 15–20 кВ/мм;
- тангенс угла диэлектрических потерь – 0,2–0,02.

В рамках проведенной работы установили, что полученный материал характеризуется термостойкостью до 400 °С. В композиции с нитридом кремния термостойкость связующего остается на прежнем уровне, за счет минерального наполнения потери массы пропорционально уменьшаются. Нитрид кремния не влияет на процесс термодеструкции, синергического эффекта между нитридом кремния и связующим, не наблюдается.

*Работа выполнена в Московском авиационном институте при финансовой поддержке РФФИ проект № 18-29-18083/18.*

#### Список литературы

- 1 Импульсные плазменные двигатели в системах управления космических аппаратов / Н. Н. Антропов [и др.] // Прикладная физика. – 2002. – № 1. – С. 37.
- 2 **Rabinskiy, L.** Development of technologies for obtaining composite material based on silicone binder for its further use in space electric rocket engines / L. Rabinskiy, S. Sitnikov // Periodico Tche Quimica. – 2018. – Vol. 15, no. 1. – P. 390–395.
- 3 **Погодин, В. А.** Технологические аспекты 3D-печати деталей газоразрядной камеры электроракетного двигателя / В. А. Погодин, Л. Н. Рабинский, С. А. Ситников // СТИН. – 2019. – № 4. – С. 20–21.

УДК 620.192.4

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ БАЛКИ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ИЗМЕНЕНИИ СТРУКТУРЫ УПРУГОГО ОСНОВАНИЯ

*А. А. ПОДДУБНЫЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*В. А. ГОРДОН*

*Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, Российская Федерация*

Построена математическая модель динамического процесса в нагруженной постоянной равномерно распределенной нагрузкой конструктивно-нелинейной системе «балка – двухпараметрическое основание», возникающего в результате внезапного изменения физико-механических свойств основания, приводящего к обнулению его сдвиговой жесткости. Решение статической задачи изгиба шарнирно закрепленной по концам балки опертой на основание Пастернака служит начальным условием задачи о вынужденных колебаниях балки на основании Винклера, возникших после внезапного образования дефекта. Решения статической и динамической задач строятся методом начальных параметров с привлечением векторов состояний сечений балки и матриц влияния начальных параметров на состояние произвольных сечений. При анализе вынужденных колебаний применяется разложение

нагрузки и прогибов исходного статического состояния в ряды по формам собственных колебаний нового состояния.

Одной из важных проблем строительной механики является анализ чувствительности несущих конструкций к структурным перестройкам и повреждениям под нагрузкой при эксплуатации типа внезапно выключающихся связей, частичных разрушений, трещин, расслоений и т. д. Получение такой информации для реальных конструкций требует разработки специальных методов, так как данная проблема не может быть решена универсальным методом. С позиции строительной механики в этих задачах возникает необходимость расчета таких конструкций, как конструктивно нелинейных, изменяющих расчетную схему под нагрузкой. Особо важным является учет внезапности образования дефекта. До возникновения дефекта напряженно-деформированное состояние конструкции определялось статическим воздействием нагрузки и реакции основания. При внезапном образовании повреждения или структурной перестройки моментально снижается общая жесткость несущей системы, нарушается статическое равновесие, и система приходит в движение, в ходе которого перераспределяются и растут деформации и внутренние силовые факторы. Такое динамическое догружение приводит к нарушению штатного функционирования конструкции – отказам, потере несущей способности, прогрессирующему разрушению.

Анализ современного состояния и ключевых направлений исследований в области взаимодействия стержневых и пластинчатых стержневых несущих систем с упругими основаниями, обзоры аналитических и численных подходов к моделированию и расчету статических состояний и динамических процессов в системе (стержень – основание) содержатся во многих работах с обширными списками источников.

Пока инженерные методики расчета напряженно-деформированного состояния нагруженных систем «балка – основание», получивших внезапные повреждения или изменения структуры, малочисленны и несовершенны. Проявление конструктивной нелинейности и их последствия описаны лишь в нескольких работах, в которых рассматриваются полное или частичное внезапное разрушение основания, либо внезапное изменение граничных условий балки на упругом основании [1].

В настоящей работе рассматривается задача – построение математической модели динамического процесса, возникающего в несущей статическую нагрузку балке, опирающейся на двухпараметрическое основание Пастернака при внезапном образовании дефекта основания, заключающегося в утрате по всей длине контакта балки с основанием свойства сдвиговой жесткости, то есть во внезапном обнулении параметра  $k_2$ .

**Математическая модель процесса строится путем последовательного решения следующих задач:**

1 Определяется статический прогиб и изгибающий момент в балке, опирающейся на упругое основание Пастернака в соответствии с граничными условиями, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой заданной интенсивности. Прогиб используется в дальнейшем как начальное условие динамического процесса (колебаний), возникающего после внезапного образования дефекта основания. Изгибающий момент используется для сравнения статических внутренних усилий в балке с динамическими в ходе колебаний.

2 Определяются частоты и формы собственных изгибных колебаний балки, опирающейся на упругое основание Винклера.

3 Исследуются вынужденные изгибные колебания нагруженной балки на основании Винклера путем разложения нагрузки и статического прогиба, полученного еще на основании Пастернака, по формам собственных колебаний балки на основании Винклера. Таким образом, расчет вынужденных колебаний строится методом модального разложения исходного состояния и нагрузки по модам нового состояния.

Для анализа перемещений и напряжений в балке при взаимодействии ее с упругим основанием во всех задачах используется метод начальных параметров в сочетании с векторно-матричным представлением состояния произвольных сечений балки.

**Вывод.** Полученные результаты показывают, что при проектировании, расчете, эксплуатации и анализе аварий следует учитывать возможность внезапных (невидимых) структурных перестроек в ответственных конструкциях, моделируемых балками, взаимодействующими с упругими основаниями, и их негативные последствия. Данная методика актуальна для решения существующих задач строительной механики и обязательно будет необходима для расчетов всевозможных модулей при строительстве сейсмостойчивых сооружений.

#### Список литературы

1 Поддубный, А. А. Методика расчёта критической силы сжатого стержня, погруженного в упругое основание / А. А. Поддубный, В. А. Гордон // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2019. – № 1(38). – С. 49–52.

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ТЕПЛОВЫХ МАКЕТОВ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ  
МОДУЛЕЙ АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ,  
ВЫПОЛНЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛОСКИХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ**

*П. О. ПОЛЯКОВ*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

*Р. В. ГОРЮНОВ*

*ПАО «Радиофизика», г. Москва, Российская Федерация*

*Ю. О. СОЛЯЕВ*

*Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Российская Федерация*

Изготовлены варианты конструкции макетов приемо-передающих модулей активной фазированной антенной решетки, выполненных с применением плоских тепловых труб, и проведены тепловые испытания для организации эффективного локального охлаждения и перераспределения тепла в приемо-передающем модуле (ППМ) активной фазированной антенной решетки (АФАР) с применением плоских тепловых труб (ТТ). Испытания проводились для аналогичных типовому модулю мощностей тепловыделения тепловых эквивалентов для двух вариантов расположения теплообменника: в зонах конденсации и испарения. Для определения эффективности работы ТТ проведено сравнение, в котором вместо ТТ установлены аналогичные по габаритам медные пластины. Использован корпус теплового макета с внешним расположением ТТ. Плоские тепловые трубы обеспечивают более эффективный отвод тепла, по сравнению с медными пластинами, во всех вариантах пространственного расположения теплового макета, включая вертикальное расположение и работу против сил гравитации. В рассматриваемых конструкциях применение ТТ является одним из наиболее предпочтительных вариантов реализации системы охлаждения, так как расстояние между приёмо-передающими модулями в системах высокочастотного диапазона оказывается чрезвычайно малым, и реализация, например воздушного охлаждения, может быть затруднительна. Применение встроенных тонких каналов жидкостного охлаждения в корпусах ППМ, потенциально, может быть альтернативой к предлагаемому решению, однако требует применения сложных технологических способов изготовления, например, методами 3D-печати. Сопоставление эффективности таких альтернативных методов реализации систем охлаждения ППМ является задачей для дальнейшей работы авторов в области исследований и разработок теплоотводящих конструкций летательных аппаратов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ код проекта «Современные технологии экспериментального и цифрового моделирования и оптимизации параметров систем космических аппаратов», код проекта FSFF-2020-0017.*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ЭКРАННО-ВАКУУМНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**

*П. Ф. ПРОНИНА, О. В. ТУШАВИНА*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Исследование планет с использованием имитаторов солнечного излучения в ряде случаев является трудноразрешимой задачей. Сложности обусловлены прежде всего тем, что часто возникает необходимость воссоздания в экспериментальной установке нестационарных во времени и в пространстве лучистых полей, формируемых одновременно и Солнцем, и планетой, например Землей. По ряду причин технического характера имитатор солнечного излучения является неподвижным. Следовательно, для воспроизведения возможного изменения ориентации испытываемого объекта относительно потока сол-

нечного излучения необходимо оснащение тепловакуумной установки устройствами, позволяющими поворачивать испытуемый объект по крайней мере относительно двух осей.

Экспериментальное исследование теплового состояния космических аппаратов в условиях, максимально приближенным к натурным, сопряжено с большими трудностями, несмотря на то, что имитационная техника позволяет воспроизводить в экспериментальной установке и поле излучения Солнца, и поле излучения планет (в соответствии с принятыми радиационными моделями) в отдельности. Поэтому важное значение приобретают приближенные методы и средства математического моделирования внешних тепловых нагрузок (в том числе и тепловое воздействие планет). Предлагается математическая модель и метод решения задачи теплопереноса в многослойной конструкции экранно-вакуумной теплоизоляции под действием солнечной радиации. Здесь ставится задача о нестационарном распределении температур по толщине и внутренней теплоизоляции, которая сводится к решению нормальной системы нелинейных дифференциальных уравнений с уравнением теплопроводности в теплоизоляции с ограничением, накладываемым на температуру внутренней поверхности экранно-вакуумной теплоизоляции. Приводятся результаты расчетов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ код проекта FSFF-2020-0016.*

УДК 539.3

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ЛИНЕЙНО-ВЯЗКОУПРУГОГО КУСОЧНО-ОДНОРОДНОГО СЛОЯ

С. Г. ПШЕНИЧНОВ

*НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

При изучении нестационарной динамики кусочно-однородных вязкоупругих тел одним из важных направлений является проведение исследований с использованием аналитических и численно-аналитических методов. Несмотря на то, что этой темой начали заниматься еще в прошлом веке [1–6] и продолжают заниматься в последнее десятилетие [7–11], исследования не являются завершенными. Это относится, в первую очередь, к случаю произвольного количества границ раздела однородных вязкоупругих составляющих тела. В данной работе рассмотрена задача о распространении нестационарных продольных волн в кусочно-однородном слое с плоскопараллельными границами раздела однородных линейно-вязкоупругих составляющих.

Рассмотрим плоский бесконечный слой толщины  $L$ , ограниченный плоскостями  $x=0$  и  $x=L$  ( $x$  – декартова координата), который изначально находится в недеформированном состоянии и покоится. Граница  $x=0$  жестко заделана, а на границу  $x=L$  в момент  $t=0$  действует равномерно распределенная нормальная нагрузка  $P(t)$ . Слой состоит из  $N$  однородных изотропных линейно-вязкоупругих составляющих (слоев) с плоскопараллельными границами контакта  $x=x_m$ ,  $m=1, 2, \dots, N-1$ , причем  $0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{N-1} < L$ . Введем безразмерные величины ( $n=1, 2, \dots, N$ ):

$$\tilde{x} = \frac{x}{L}, \quad \tilde{t} = \frac{t}{t_0}, \quad \tilde{x}_m = \frac{x_m}{L}, \quad \tilde{u}^{(n)}(\tilde{x}, \tilde{t}) = \frac{u^{(n)}(x, t)}{L}, \quad \tilde{\sigma}_x^{(n)}(\tilde{x}, \tilde{t}) = \frac{\sigma_x^{(n)}(x, t)}{2G_0^{(n)}},$$

$$\tilde{T}_s^{(n)}(\tilde{t}) = t_0 T_s^{(n)}(t), \quad \tilde{T}_v^{(n)}(\tilde{t}) = t_0 T_v^{(n)}(t), \quad a_n(\tilde{t}) = \frac{1}{3(1-\nu_0^{(n)})} [(1 + \nu_0^{(n)})\tilde{T}_v^{(n)}(\tilde{t}) + 2(1 - 2\nu_0^{(n)})\tilde{T}_s^{(n)}(\tilde{t})],$$

$$P_0 f(\tilde{t}) = \frac{P(t)}{2G_0^{(N)}}, \quad \kappa_n = \frac{c_N}{c_n}, \quad w_n = \frac{1 - \nu_0^{(n)}}{1 - 2\nu_0^{(n)}},$$

где  $t_0 = L/c_N$ ; при этом  $u^{(n)}(x, t)$ ,  $\sigma_x^{(n)}(x, t)$  – перемещение вдоль оси  $x$  и соответствующее нормальное напряжение в  $n$ -й однородной составляющей;  $G_0^{(n)}$ ,  $\nu_0^{(n)}$  – мгновенные значения модуля сдвига и коэффициента Пуассона,  $c_n$  – скорость продольных упругих волн,  $T_s^{(n)}$ ,  $T_v^{(n)}$  – ядра сдвиговой и объемной релаксации, относящиеся к  $n$ -й однородной составляющей;  $P_0$  – безразмерная константа. Далее знак тильды над безразмерными величинами опустим.

В отсутствии массовых сил математическая постановка задачи об одномерном движении однородных компонент слоя вдоль оси  $x$  в безразмерной форме включает в себя уравнения:

$$(1 - \hat{a}_n) \frac{\partial^2 u^{(n)}}{\partial x^2} - \kappa_n^2 \frac{\partial^2 u^{(n)}}{\partial t^2} = 0, \quad \sigma_x^{(n)}(x, t) = w_n (1 - \hat{a}_n) \frac{\partial u^{(n)}}{\partial x}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где  $\hat{a}_n u^{(n)}(x, t) = \int_0^t a_n(t - \tau) u^{(n)}(x, \tau) d\tau$ ; (2)

граничные условия:

$$u^{(1)}(0, t) = 0, \quad \sigma_x^{(N)}(1, t) = -P_0 f(t), \quad t > 0; \quad (3)$$

условия непрерывности на контакте однородных компонент:

$$u^{(m)}(x_m, t) = u^{(m+1)}(x_m, t), \quad G_0^{(m)} \sigma_x^{(m)}(x_m, t) = G_0^{(m+1)} \sigma_x^{(m+1)}(x_m, t), \quad m = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4)$$

и начальные условия:

$$u^{(n)}(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial u^{(n)}}{\partial t}(x, 0) = 0, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

После применения к уравнениям и соотношениям (1)–(4) интегрального преобразования Лапласа по времени ( $s$  – параметр преобразования) с учетом начальных условий (5) получим задачу относительно изображений перемещений  $U^{(n)}(x, s)$ , решение которой имеет вид

$$U^{(n)}(x, s) = -P_0 F(s) [\operatorname{sh}(y_n) C_1^{(n)}(s) + \operatorname{ch}(y_n) C_2^{(n)}(s)], \quad y_n = x \kappa_n s / \sqrt{1 - A_n(s)}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где  $F(s)$ ,  $A_n(s)$  – изображения  $f(t)$ ,  $a_n(t)$ . Полученные в явном виде выражения для функций  $C_1^{(n)}(s)$ ,  $C_2^{(n)}(s)$  содержат величины  $\sqrt{1 - A_1(s)}$ ,  $\sqrt{1 - A_2(s)}$ , ...,  $\sqrt{1 - A_n(s)}$ .

Несмотря на сложную структуру решения (6) и наличие квадратных корней, согласно доказанному в работе [12] общему утверждению, точками ветвления функций  $U^{(n)}(x, s)$  могут быть только точки ветвления  $F(s)$  и  $A_n(s)$ , если их множество конечно. В случае регулярных наследственных ядер в виде конечной суммы экспонент и при соответствующей функции внешней нагрузки  $f(t)$  (например, в виде функции Хевисайда) точек ветвления у изображений  $U^{(n)}(x, s)$  не будет. Это позволяет в конечном счете построить оригиналы  $u^{(n)}(x, t)$  в виде бесконечной суммы вычетов в полюсах  $U^{(n)}(x, s)$ . Заметим, что множество полюсов изображений будет иметь конечные предельные точки, помимо бесконечно удаленной. Кроме того, как при регулярных, так и при сингулярных наследственных ядрах искомые оригиналы  $u^{(n)}(x, t)$  можно представить в форме, содержащей интеграл по мнимой оси [12], удобной для численной реализации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-08-00471 а, 19-08-00438 а).*

#### Список литературы

- 1 **Козлов, В.И.** Динамическое поведение многослойных цилиндрических конструкций при нестационарных нагрузках / В. И. Козлов, Н. К. Кучер // Проблемы прочности. – 1980. – № 5. – С. 97–103.
- 2 **Локшин, А. А.** Головная волна на границе двух наследственно-упругих полупространств / А. А. Локшин // Прикл. мат. и мех. – 1994. – Т. 58. – № 1. – С. 162–167.
- 3 **Нуриев, Б. Р.** Удар по вязкоупругому слоистому композиту / Б. Р. Нуриев // Изв. АН АзССР. Сер. физ.-техн. и мат. наук. – 1985. – № 4. – С. 35–41.
- 4 **Сабодаш, П. Ф.** Распространение продольных вязко-упругих волн в трехслойной среде / П. Ф. Сабодаш // Механика полимеров. – 1971. – № 1. – С. 151–156.
- 5 **Стулов, А. С.** Распространение продольных волн деформации в дискретно-слоистых линейных средах с памятью / А. С. Стулов // Изв. АН Эстонии. Сер. Физ. Матем. – 1991. – Т. 40. – № 2. – С. 115–121.
- 6 **Songnan, L.** Dynamic response of layered viscoelastic half-space and its application to dynamic foundation problems / L. Songnan, G. Ping // Hunan daxue xuebao. J. Hunan Univ. – 1993. – Vol. 20. – No. 1. – P. 57–64.
- 7 **Баженов, В. Г.** Гранично-элементное моделирование динамики кусочно-однородных сред и конструкций / В. Г. Баженов, А. А. Белов, Л. А. Игумнов. – Н. Новгород : ННГУ, 2009. – 180 с.
- 8 **Белов, А. А.** Гранично-элементный расчет динамики составных вязкоупругих тел / А. А. Белов // Проблемы прочности и пластичности : межвуз. сб. – Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2008. – Вып. 70. – С. 164–170.

9 **Петров, А. Н.** Расчет методом граничных элементов динамики составных вязкоупругих тел. Механика деформируемого твердого тела / А. Н. Петров, М. Д. Ермолаев // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – Т. 4. – № 4. – С. 1694–1696.

10 **Hyung, S. L.** Viscowave – a new solution for viscoelastic wave propagation of layered structures subjected to an impact load. International / S. L. Hyung // International Journal of Pavement Engineering. – 2014. – Vol. 15. – No. 6. – P. 542–557.

11 **Hashemi, Sh. H.** Dynamic behavior of multi-layered viscoelastic nanobeam system embedded in a viscoelastic medium with a moving nanoparticle / Sh. H. Hashemi // Journal of Mechanics. – 2017. – Vol. 33. – No. 5. – P. 559–575.

12 **Пшеничнов, С. Г.** Динамические задачи линейной вязкоупругости для кусочно-однородных тел / С. Г. Пшеничнов // Известия РАН. МТТ. – 2016. – № 1. – С. 79–89.

УДК 37.091.212.2

## АНАЛИЗ УРОВНЯ ЗНАНИЙ АБИТУРИЕНТОВ И СТУДЕНТОВ ПЕРВОГО КУРСА

*Ю. А. ПШЕНИЧНОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Безопасность на транспорте во многом определяется компетентностью специалистов. В свою очередь успешность учебы студентов транспортных специальностей и их мотивация зависит от уровня знаний, полученных абитуриентом в средней школе.

В период окончания средней школы, централизованного тестирования (ЦТ) и первой экзаменационной сессии в университете проводятся три педагогических измерения уровня знаний абитуриента и студента, результатами которых являются средний балл аттестата, количество баллов, полученных при ЦТ, и средний балл первой экзаменационной сессии. При зачислении абитуриентов используется сумма первых двух параметров, хотя уровни их объективности существенно отличаются.

В [1] проведен сравнительный анализ результатов средних баллов ЦТ абитуриентов, поступивших в БелГУТ в 2017 году, и первой экзаменационной сессии. Построена диаграмма рассеивания (разброса), изображающая значения средних баллов первой экзаменационной сессии (выборка  $Y$ ) и ЦТ (выборка  $X$ ) в виде точек на декартовой плоскости. Выборки включали по 388 элементов. Проведен регрессионный анализ в среде Mathcad. Получены уравнение линейной регрессии и коэффициент корреляции двух выборок, равный 0,653, которому соответствует приемлемый уровень связи выборок  $X$  и  $Y$ .

Результаты регрессионного анализа выборок  $X$  и  $Y$  для 2018/19 учебного года, размером 547 элементов, представлены на диаграмме рассеивания (рисунок 1).

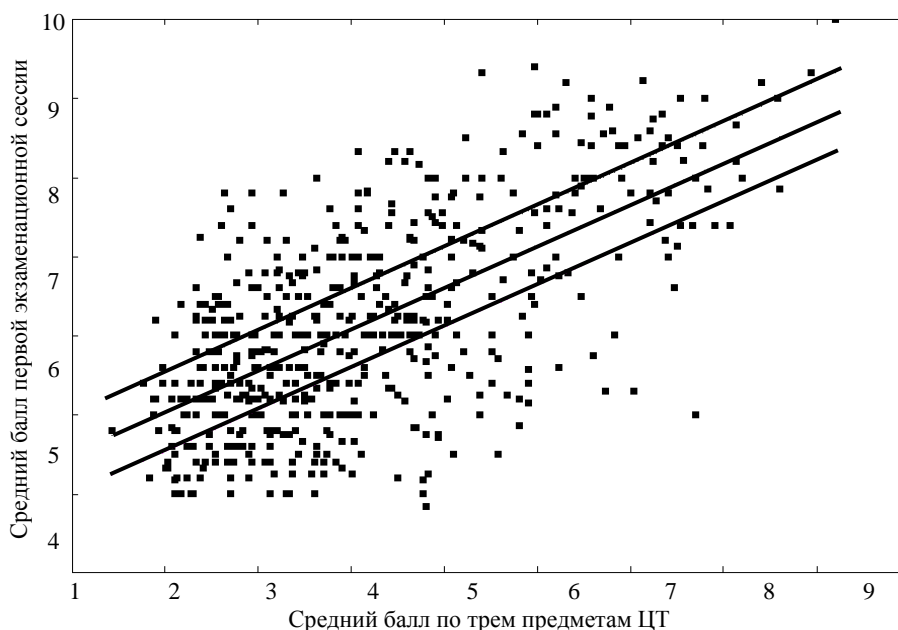


Рисунок 1 – Диаграмма рассеивания  $X$  и  $Y$  в 2018/19 учебном году

Точка на диаграмме имеет координаты  $x_i$  и  $y_i$ , где  $i$  – номер студента в выборках ( $i = 1 \dots 547$ ). Наблюдается большой разброс точек. Средняя прямая линия проведена согласно линейному уравнению регрессии. Коэффициент корреляции составил значение 0,643, которому соответствует приемлемый уровень связи выборок  $X$  и  $Y$ .

Из диаграммы рассеивания видно, что низким значениям среднего балла (от 4 до 6) первой экзаменационной сессии соответствуют и низкие значения среднего балла (в основном, от 2 до 4) по трем предметам ЦТ без учета среднего балла школьного аттестата.

Можно предположить, что гипотетический студент, получивший при централизованном тестировании  $x$  баллов, а на первой сессии средний по всем экзаменам балл, определяемый по формуле  $y = ax + b$ , т. е. согласно линии тренда, учился в первом семестре в соответствии со своими способностями (возможностями). Линия тренда делит все множество точек на две части. Верхняя часть представляет значения выборок тех студентов, которые в среднем на экзаменационной сессии показали результаты выше, чем при централизованном тестировании. Значения выборок нижней части соответствуют студентам, которые сдали сессию ниже своих способностей, показанных на централизованном тестировании.

Принимая погрешность полученного среднего балла первой экзаменационной сессии равным  $\pm 0,5$  балла, проведем на графике параллельно линии тренда выше и ниже на 0,5 балла.

Множество точек на диаграмме рассеивания эти две линии разбивают на три части. В соответствии с таким делением всех студентов после учебы в первом семестре можно разделить на три группы:

- студенты, получившие на экзаменах существенно более высокие баллы, чем баллы централизованного тестирования;
- студенты, которые в пределах погрешности  $\pm 0,5$  балла учились в среднем в соответствии со своими возможностями;
- студенты, которые работали в первом семестре существенно ниже своих возможностей.

На основании построенной модели для каждой студенческой группы каждого факультета и факультета в целом были программно сформированы списки студентов, которые при учебе в первом семестре предположительно в значительной мере не использовали свои возможности. Эти списки предназначены для более целенаправленной индивидуальной воспитательной работы со студентами.

Анализ диаграммы рассеивания для выборок  $Y$  и  $Z$  (средний балл школьного аттестата) для 547 абитуриентов показал, что низким значениям среднего балла (от 4 до 6) первой экзаменационной сессии соответствуют более высокие значения среднего балла (в основном, от 7 до 9) школьного аттестата. По-видимому, это связано с тем, что в школах требования к уровню знаний существенно ниже, чем в университете.

Анализ диаграммы рассеивания для выборок среднего балла школьного аттестата  $Z$  и среднего балла по трем предметам ЦТ  $X$  показал, что низким значениям среднего балла (от 4 до 6) первой экзаменационной сессии соответствуют более высокие значения среднего балла (в основном, от 7 до 9) школьного аттестата. Возможно, это связано как с несовершенством ЦТ, так и с низким уровнем знаний, полученным в средней школе, значительной частью школьников.

В таблице 1 показаны значения показателей проведенного анализа для 2017/18 и 2018/19 учебных годов.

Таблица 1 – Сравнение результатов проведенного анализа связи выборок  $X$ ,  $Y$  и  $Z$

Показатель	Учебный год	
	2017/18	2018/19
Размер выборки	388	547
Средний балл 1-ой сессии	6,04	6,16
Средний балл аттестата	8,05	8,29
Средний балл ЦТ	3,78	4,13
Коэффициент корреляции	0,653	0,643
Коэффициент $a$ уравнения регрессии	0,478	0,526
Коэффициент $b$ уравнения регрессии	4,229	3,984
Доля студентов, получивших на экзаменах более высокие баллы, чем баллы ЦТ	0,286	0,316
Доля студентов, которые в 1-м семестре учились в соответствии результатами ЦТ	0,423	0,373
Доля студентов, которые работали в первом семестре ниже своих возможностей	0,291	0,311

Из таблицы 1 видно, что наблюдается небольшой рост средних баллов по всем трем выборкам.

#### Список литературы

- 1 Пшеничнов, Ю. А. Сравнение результатов первой экзаменационной сессии и централизованного тестирования / Ю. А. Пшеничнов // Инновационный опыт идеологической, воспитательной и информационной работы в вузе : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Г. М. Чаянковой. – Гомель : БелГУТ, 2018. – С. 106–109.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СИНТЕЗА**

*Л. Н. РАБИНСКИЙ, Г. РЕСУЛКУЛЫЕВА*

*Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Получены результаты численного решения плоской задачи о пошаговом росте тонкой вертикальной стенки в процессе ее послойного лазерного выращивания. В предложенном методе моделирования конечно-элементная сетка строится на каждом новом шаге расчета, а решения на разных шагах расчета сращиваются путем переопределения и экстраполяции начальных условий.

В результате тестовых расчетов выявлено, что для изделий простой геометрии можно использовать квазистационарные решения для приближенной оценки макроскопического теплового состояния.

Показано, что пошаговое решение нестационарной задачи для растущего тела и соответствующее квазистационарное решение оказываются близкими. Показано, в частности, что такой подход предоставляет возможность получения быстрых прогнозов, позволяющих принять оперативное решение о выборе параметров синтеза для конкретной области геометрии выращиваемого изделия, при этом область, для которой строится квазистационарное решение, должна быть достаточно большой, чтобы в процессе выращивания в ней успевал реализоваться стационарный режим. В проведенных тестовых расчетах получено, что квазистационарная оценка может применяться при выращивании тонкой вертикальной металлической стенки с высотой равномерного роста не менее одного сантиметра.

Показано, что упрощенные квазистационарные решения могут быть полезны для первоначальной оценки возможности возникновения макроскопических градиентов температуры, которые могут приводить к критическому искажению геометрии изделий или к их отрыву от рабочей платформы в процессе синтеза. Проведены оценки точности метода прогноза теплового состояния изделий на базе квазистационарных решений. В частности, можно приближенно оценить размер прогретой области детали, средний уровень нагрева, характер распределения и отвода тепла в процессе синтеза, в то же время точную оценку теплового состояния, несомненно, необходимо получать, проводя нестационарные расчеты для растущих структур.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 20-01-00517).*

## **ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*Е. Г. САРАСЕКО*

*Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Республики Беларусь*

Транспортный комплекс при выполнении своей важной социально-экономической функции потребляет значительное количество топливно-энергетических и других невозобновляемых ресурсов. На всех стадиях производства, эксплуатации и утилизации транспортных средств окружающей среде и обществу наносится значительный экологический ущерб, связанный:

- с выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух;
- транспортным шумом и вибрацией;
- загрязнением почвенного покрова и водных ресурсов;
- образованием отходов;
- изъятием земельных и лесных ресурсов при строительстве транспортной инфраструктуры [1].

В процессе эксплуатации транспорта в атмосферный воздух попадает большое количество загрязняющих веществ, содержащихся в отработавших газах силовых установок. Наиболее канцерогенными из них являются: оксид углерода; диоксиды азота и серы; сажа; альдегиды; соединения тяжелых металлов; углеводороды [1].



Воздействие основных загрязнителей природной среды от автотранспортных средств на здоровье человека приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Действие загрязняющих веществ на организм человека [2]

Загрязняющее вещество	Воздействие на организм человека
Оксид углерода	Препятствует кислородному обмену в крови, поражает нервную систему, нарушает сердечную деятельность
Оксиды азота	Раздражает глаза и слизистые оболочки
Углеводороды	Способствуют развитию раковых заболеваний
Сажа	Раздражает слизистые оболочки; способствует развитию раковых заболеваний; оказывает воспалительное действие
Бенз(а)пирен	Наиболее типичный химический канцероген, он опасен для человека даже при малой концентрации, поскольку обладает свойством
Свинец	Поражает нервную систему и костную ткань

За период с 2002 по 2012 год количество автомобилей в Республике Беларусь возросло на 65 %, при этом доля личных автомобилей за указанный период составляет более 71 %, с постоянной тенденцией к увеличению. 21 % автопарка республики сосредоточен в городе Минске [1].

В настоящее время различают различные отрицательные экологические последствия автомобилизации на загрязнение окружающей среды, например:

- ингредиентное: воздух, вода, почва;
- параметрическое: шум, тепло, электромагнитное излучение, вибрация;
- связанное с потреблением ресурсов, затратами труда, сокращением мест обитания, гибелью живых организмов [2].

В связи с этим, снижение техногенной нагрузки на окружающую среду (ОС) от воздействия автотранспортных средств может быть обеспечено:

- безопасностью движения;
- снижением шума от автотранспортных средств;
- снижением выбросов ингредиентов, загрязняющих окружающую среду [2].

Снижение шума – это бесшумность двигателя, коробки передач, главной передачи, тормозных механизмов шин, плотность соединений кузова, стабильность и бесшумность в процессе эксплуатации автомобиля. Различают активные и пассивные методы защиты от шума. К активным относятся методы и средства, устраняющие источники возникновения шума (уменьшение зазоров и повышение точности изготовления деталей, замена металлических деталей пластмассовыми и др.). К пассивным относятся методы и средства шумозащиты, шумопоглощения и шумоизоляции.

Снижение выбросов ингредиентов, загрязняющих окружающую среду, – это переход на более экологически чистые виды топлива; применение различных конструкций нейтрализаторов отработавших газов (ОГ) двигателей; полнота сгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) при всех режимах работы; отсутствие отравляющих компонентов в отработавших газах; предотвращение попадания картерных газов в атмосферу. Нейтрализаторы отработавших газов получили широкое распространение для снижения количества выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания и уменьшения их уровней токсичности. Принцип нейтрализации токсичных компонентов отработавших газов основан на беспламенном каталитическом дожигании горючих токсичных компонентов на поверхности каталитического блока. При этом оксид углерода преобразуется в двуокись углерода, а углеводороды – в двуокись углерода и воду. Установка нейтрализаторов отработавших газов применяется как дополнительное оборудование, которое без значительных изменений в конструкции двигателя легко встраивается в выпускной тракт двигателя и обеспечивает внешнюю экологическую очистку. Каталитическая нейтрализация помимо окислительных реакций предполагает использование и восстановительных: для восстановления оксидов азота в исходные вещества – кислород и азот. Катализаторы представляют собой собственно активный каталитический слой, нанесенный на инертное тело – носитель, который размещают в корпусе нейтрализатора. В окислительных и восстановительных реакциях могут применяться относительно дешевые окисные катализаторы на основе меди, марганца, никеля, хрома и других, но они обладают малой долговечностью и эффективностью. Поэтому достаточное распространение получили катализаторы на основе благородных металлов – платино-палладиевые,

дающие степень очистки 70–90 %. Ограничивают применение каталитических нейтрализаторов высокая стоимость, невозможность работы с этилированным бензином (соединения свинца и серы выводят катализаторы из строя) и жесткие технические требования к их конструкции [2].

Также одним из решений проблем теплового загрязнения атмосферы и загрязнения атмосферы вредными веществами является переход двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на альтернативные топлива. Альтернативным, но пока не перспективным топливом для дизельных ДВС является диметиловый эфир. Он производится из природного газа, из которого сначала получают метанол, а затем диметиловый эфир. Диметиловый эфир имеет свойства, аналогичные свойствам дизельного топлива. Перспективным альтернативным топливом для ДВС является биотопливо. Недостатком его является некоторое загрязнение атмосферы при его производстве. Необходимо отметить, что наиболее значительными продуктами биотоплива являются биоэтанол – жидкое спиртовое топливо (безводный спирт) и биодизель – эфиры растительных масел или животных жиров, получаемых в результате химической реакции масла или жира с метанолом [3].

#### Список литературы

1 Стратегия по снижению вредного воздействия транспорта на атмосферный воздух Республики Беларусь на период до 2020 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://naturegomel.by/sites/default/files/inline/files/strategiya\\_po\\_snizheniyu\\_vrednogo\\_vozdeystviya\\_transporta.pdf](https://naturegomel.by/sites/default/files/inline/files/strategiya_po_snizheniyu_vrednogo_vozdeystviya_transporta.pdf). – Дата доступа : 12.05.2020.

2 **Борисова, Г. М.** Нормативы по защите окружающей среды: курс лекций / Г. М. Борисова. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 95 с.

3 Меры по снижению загрязнения атмосферы вредными веществами [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mcx-consult.ru/meru-po-snizheniyu-zagryazneniya-at> – Дата доступа : 12.05.2020.

УДК: 539.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕОГРАНИЧЕННОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ КИРХГОФА

*А. О. СЕРДЮК<sup>1</sup>, Д. О. СЕРДЮК<sup>1</sup>, Г. В. ФЕДОТЕНКОВ<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

*<sup>2</sup>НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

Пластины представляют широкий класс конструктивных элементов в авиации и космонавтике. Исследование их напряженно-деформированного состояния при статических и ударных нагрузках является неотъемлемым этапом проектирования новых конструктивных элементов перспективных летательных аппаратов. Наиболее трудоемким является исследование поведения конструкций при нестационарных динамических воздействиях, поскольку в этом случае присутствует существенная неоднородность напряженно-деформированного состояния по координатам и времени.

В трудах [1, 2] исследуются вопросы нестационарной динамики изотропных пластин и оболочек. Задачи нестационарной динамики анизотропных пластин и цилиндрических оболочек освещены в работах [3–5].

Объектом исследования является тонкая пластина постоянной толщины  $h$ . Движение пластины рассматривается относительно декартовой системы координат  $Ox_1x_2x_3$ . Плоскость  $Ox_1x_2$  совпадает со срединной плоскостью пластины. В начальный момент времени к невозмущенной пластине прикладывается нестационарное нормальное давление  $p(x_1, x_2, t)$ .

Материал пластины принят упругим и анизотропным с симметрией относительно срединной плоскости пластины. Для пластины Кирхгофа он характеризуется шестью независимыми упругими постоянными  $C^{1111}, C^{1122}, C^{1112}, C^{2222}, C^{2212}, C^{1212}$ .

Уравнение движения анизотропной пластины в перемещениях имеет вид:

$$\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -ID(w) + p(x_1, x_2, t),$$

$$D(w) = c_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} + c_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} + 2(c_{12} + 2c_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + 4c_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^3 \partial x_2} + 4c_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1 \partial x_2^3}, \quad (1)$$

где  $c_{11} = C^{1111}, c_{12} = C^{1122}, c_{16} = C^{1112}, c_{22} = C^{2222}, c_{26} = C^{2212}, c_{66} = C^{1212}, I = h^3 / 12$ .

Уравнение (1) совместно с начальными условиями

$$w|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial t}|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

образуют начальную задачу. В соотношениях (1), (2)  $t$  – время,  $w$  – нормальный прогиб,  $\rho$  – плотность материала.

Цель исследования заключается в построении нестационарных функций нормальных и касательных напряжений  $\sigma_{x_1}(x_1, x_2, t)$ ,  $\sigma_{x_2}(x_1, x_2, t)$ ,  $\tau_{x_1x_2}(x_1, x_2, t)$  в ответ на воздействие нестационарного движущегося давления  $p(x_1, x_2, t)$ , распределенного по прямоугольной площадке.

Подход к решению основан на методе функции Грина и принципе суперпозиции, согласно которому искомое решение связано с давлением посредством интегрального оператора типа свёртки по пространственным переменным и по времени. Ядром этого оператора является функция Грина для пластины, которая представляет собой нормальные перемещения в ответ на воздействие единичной нагрузки, математически описанной дельта-функцией Дирака. Для построения функции Грина применяются прямые и обратные интегральные преобразования Лапласа по времени и двумерное преобразование Фурье по координатам. Оригинал интегрального преобразования Лапласа найден аналитически, а для обратного интегрального преобразования Фурье использован численный метод интегрирования быстро осциллирующих функций. Полученное фундаментальное решение позволило представить искомый нестационарный прогиб в виде тройной свёртки функции Грина с функцией движущегося нестационарного давления, распределенного по прямоугольной площадке. Для вычисления интегралов свёрток использован метод прямоугольников.

При внезапном воздействии на пластину нестационарного движущегося вдоль осей  $x_1$ ,  $x_2$  по законам  $f(t)$  и  $g(t)$  соответственно давления, распределенного по прямоугольной площадке, зависящей от времени по закону  $P(t)$ , выражение для нестационарного нормального прогиба примет вид:

$$w(x_1, x_2, t) \approx \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^m \sum_{k=1}^n \frac{a}{p} \frac{b}{m} \frac{t}{n} G_{ijk}(x_1, x_2, t) P\left(\frac{t}{n} - k\right), \quad (3)$$

$$G_{ijk}(x_1, x_2, t) = G\left(x_1 - \frac{a}{p}i + \frac{a}{2} + f\left(\frac{t}{n} - k\right), x_2 - \frac{b}{m}j + \frac{b}{2} + g\left(\frac{t}{n} - k\right), t - \frac{t}{n}k\right),$$

где  $a$ ,  $b$  – размеры прямоугольной площадки давления,  $G$  – функция влияния.

Нормальные  $\sigma_{x_1}$ ,  $\sigma_{x_2}$  и касательные  $\tau_{x_1x_2}$  напряжения в пластине с учетом (3) определяются как:

$$\sigma_{x_1}(x_1, x_2, t) = -x_3 \left( c_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + 2c_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right),$$

$$\sigma_{x_2}(x_1, x_2, t) = -x_3 \left( c_{21} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + 2c_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right), \quad (4)$$

$$\tau_{x_1x_2}(x_1, x_2, t) = -x_3 \left( c_{16} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + 2c_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} + c_{26} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right),$$

где  $-\frac{h}{2} \leq x_3 \leq \frac{h}{2}$ .

Соотношения (3) и (4) позволяют исследовать пространственно-временное деформированное и напряженное состояние неограниченной тонкой упругой анизотропной пластины Кирхгофа при воздействии нестационарного движущегося давления, распределенного по прямоугольной площадке.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 20-19-00217).*

#### Список литературы

- 1 Горшков, А. Г. Волны в сплошных средах / А. Г. Горшков. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с.
- 2 Tarlakovskii, D. V. Nonstationary 3D motion of an elastic spherical shell / D. V. Tarlakovskii, G. V. Fedotenkov // Mechanics of Solids. – 2015. – Vol. 50. – No. 2. – P. 208–217. – DOI: 10.3103/S0025654415020107.
- 3 Локтева, Н. А. Нестационарная динамика тонких анизотропных упругих цилиндрических оболочек / Н. А. Локтева, Д. О. Сердюк, П. Д. Скопинцев // Динамические и технологические проблемы Механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVI Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. – Т. 2. – М. : ООО «ТРП», 2020. – С. 90–91.

4 Сердюк А. О. Функция Грина для неограниченной тонкой анизотропной пластины / А. О. Сердюк, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков // Динамические и технологические проблемы Механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVI Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. Т. 2. – М. : ООО «ТРП», 2020. – С. 106–108.

5 Сердюк А. О. Функция влияния для пластины с произвольной анизотропией материала / А. О. Сердюк, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : материалы XXVI Междунар. симпозиума им. А. Г. Горшкова. Т. 2. – М. : ООО «ТРП», 2020. – С. 108–110.

УДК 621.643.412

## РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПЛОСКИМИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫМИ ПРОКЛАДКАМИ

*Е. В. СЕРПИЧЕВА<sup>1</sup>, С. В. ШИШКИН<sup>1</sup>, Г. В. ФЕДОТЕНКОВ<sup>1,2</sup>*

*<sup>1</sup>Московский авиационный институт (НИУ)*

*<sup>2</sup>НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

В авиационной технике широко используются фланцевые соединения с плоскими уплотнительными прокладками, прочность и герметичность которых нередко определяет безопасность и работоспособность различных конструкций. В эксплуатации магистрали подвергаются циклическому и динамическому нагружению. Поэтому при прочих равных условиях их усталостная прочность зависит от массы соединений. Однако нерациональное снижение жесткости фланцев приводит к существенному увеличению неравномерности давления на прокладку. Отсюда, есть вероятность, как раскрытия стыка, так и разрушения уплотнения из-за превышения допустимой величины контактной нагрузки.

При проектировании соединений минимальной массы возникает необходимость разработки методики проверочного расчета его деталей на прочность. Подобная постановка задачи определяет предельную деформацию изгиба фланцев при затяжке болтов и приложении рабочей нагрузки. Рационально спроектированные конструкции отличаются довольно низким коэффициентом основной нагрузки, что благоприятно влияет на усталостную прочность болтов. При невысоких температурах и рабочих нагрузках используют неметаллические прокладки с целью дальнейшего снижения массы узла. В этих конструкциях применяют нежесткие фланцы, поскольку их изгиб компенсируется податливостью уплотнения. Низкая величина допускаемого давления на прокладку определяет относительно невысокие усилия затяжки болтов. Это позволяет ставить более лёгкий крепёж и уменьшить радиальный габарит фланцев.

Приближённый анализ распределения давления в герметизируемом стыке контактной нагрузки с достаточной точностью может быть сделан на упрощенных моделях фланцев в виде колец. Такая схематизация реальных деталей оказывается возможной при условии разделения их деформаций на общие (изгиб) и местные (сжатие фланцев и прокладки) и их определении изолированно друг от друга. Указанный подход позволяет использовать известные уравнения теории осесимметричной деформации кольца, связывающие перемещения точек расчётной модели с действующими на неё усилиями.

В работе рассмотрена кольцевая модель соединения с учетом дополнительной жесткости крепежа и присоединительных труб с независимым граничным слоем, податливость которого определяется сжатием фланцев, прокладки и деформацией шероховатости уплотняемых поверхностей.

Построена функция распределения контактного давления по радиусу уплотнения, показано, что она имеет линейный характер в зависимости от затяжки болтов и приложения рабочей нагрузки, а её неравномерность зависит от жесткости фланцев и общей податливости граничного слоя расчётной модели.

Выработаны основные рекомендации по проектированию компактных, конструкций фланцевых соединений с плоскими уплотнительными прокладками с целью минимизации их массы и сформулированы базовые критерии прочности деталей узла, гарантирующие его работоспособность.

Показано, что в соединениях с нежесткими фланцами целесообразно использовать неметаллические уплотнения, высокая податливость которых компенсирует из-за плоских тарелок и обеспечивает требуемую неравномерность контактной нагрузки в уплотняемом стыке.

## АНАЛИЗ ШАРНИРНОГО ОПИРАНИЯ БАЛКИ НА ЧЕТВЕРТЬПРОСТРАНСТВО И ОДНУ ВОСЬМУЮ ПРОСТРАНСТВА

П. Д. СКАЧЁК

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Рассматривается однопролетная балка, шарнирно опираемая слева и справа (рисунок 1). При этом стена справа моделируется упругим четвертьпространством, а стена слева – упругой одной восьмой частью пространства. Ставится задача об определении минимального расстояния  $t$  от оси балки до вертикальной грани одной восьмой пространства, при котором напряженно-деформированное состояние одной восьмой упругого пространства становится аналогичным (с определенной погрешностью) напряженно-деформированному состоянию упругого четвертьпространства.

Для построения физической и математической модели поставленной задачи принимаются следующие допущения [1, 2]:

- для балки справедливы гипотезы изгиба;
- связи Б. Н. Жемочкина [3] принимаются односторонними, работающими только на сжатие;
- в зоне контакта не учитываются касательные напряжения.

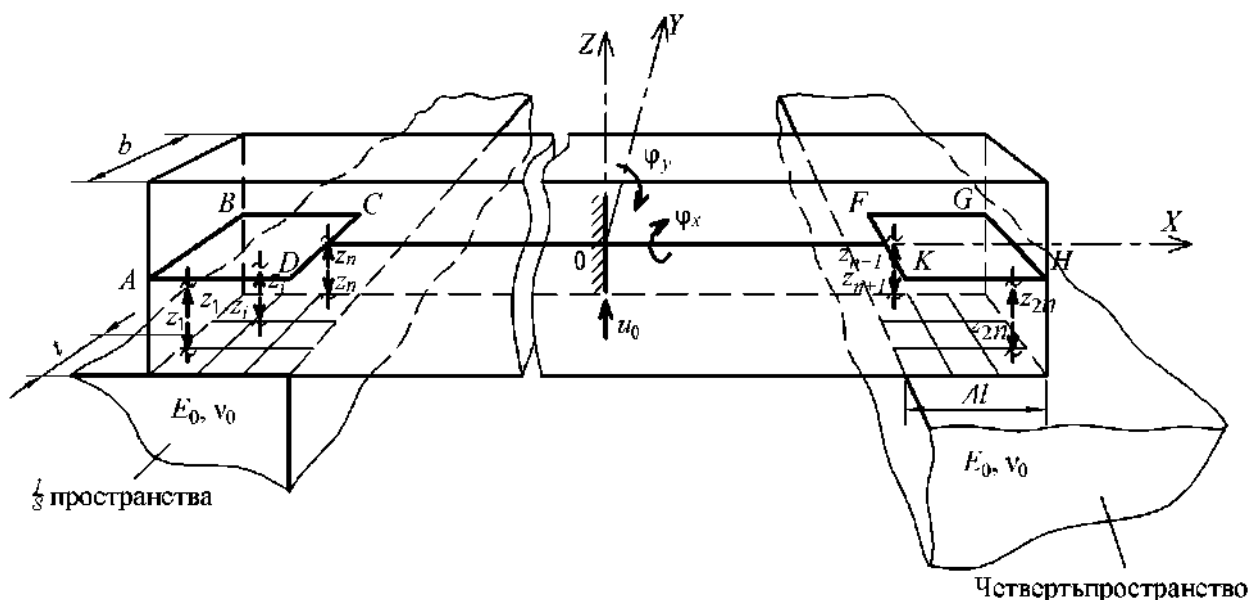


Рисунок 1 – Расчетная схема балки:

$ABCD$  и  $KFGH$  – элементы срединной плоскости балки;  $XOY$  – система координат, начало которой совпадает с серединой пролета балки, ось  $X$  – направлена вдоль продольной оси балки; ось  $Y$  – горизонтальная ось, перпендикулярная оси  $X$ ; ось  $Z$  – вертикальная ось, перпендикулярная оси  $X$ ;  $b$  – ширина балки;  $\Delta l$  – глубина опирания балки;  $E_0, \nu_0$  – модуль деформаций и коэффициент Пуассона упругого четвертьпространства и упругой одной восьмой пространства;  $u_0, \varphi_x, \varphi_y$  – вертикальное и угловые перемещения середины балки относительно осей  $X$  и  $Y$  соответственно;  $z_i$  – усилие в связи Б. Н. Жемочкина;  $n$  – количество участков Б. Н. Жемочкина в одном узле;  $t$  – расстояние от оси балки до грани одной восьмой пространства

По расчетной схеме составляется система линейных алгебраических уравнений (1) смешанного метода строительной механики [3, 4]

$$A\bar{Z} + B = 0, \quad (1)$$

где  $A$  – матрица коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений;  $\bar{Z} = \{z_1, \dots, z_{2n}, u_0, \varphi_x, \varphi_y\}$  – вектор-столбец неизвестных смешанного метода строительной механики;  $B$  – столбец свободных членов;  $z_i$  – неизвестное усилие в связи  $i$  Б. Н. Жемочкина;  $u_0, \varphi_x, \varphi_y$  – неизвестные вертикальное и угловые перемещения во введенном защемлении;  $n$  – количество участков Б. Н. Жемочкина в одном узле.

Затем решается СЛАУ (1). И после проведения итерационного процесса определяется фактическая область контакта с возникающими в ней контактными напряжениями.

Несимметричное опирание приводит к возникновению в балке постоянного по длине балки крутящего момента. На рисунке 2 показан график зависимости величины относительного крутящего момента от относительного расстояния между продольной осью балки и параллельного ей края одной восьмой пространства.

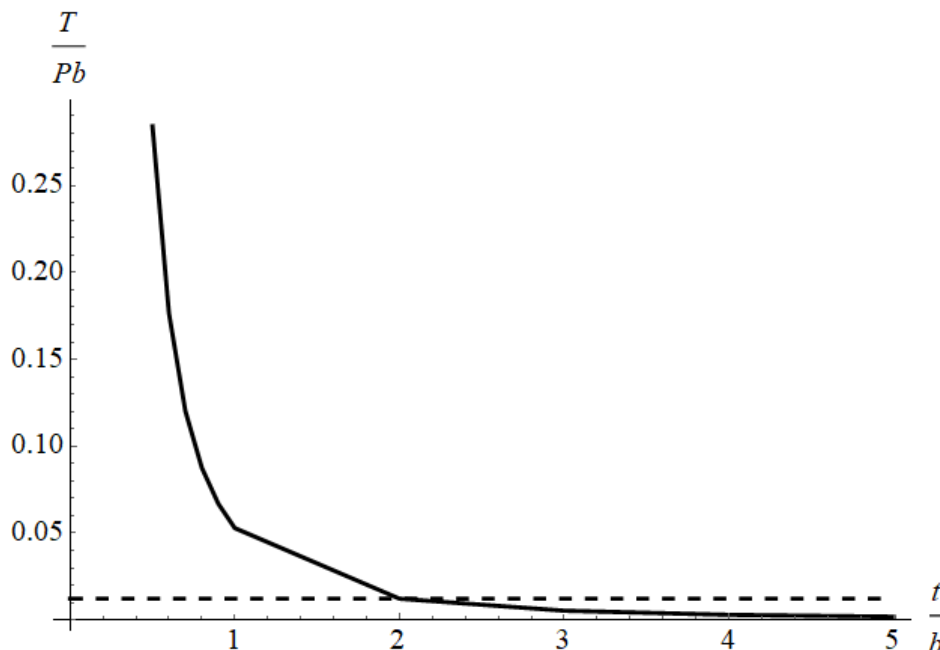


Рисунок 2 – Зависимость относительного крутящего момента  $T/(Pb)$  в балке от относительного расстояния  $t/b$  (см. рисунок 1) до края одной восьмой упругого пространства;  $P$  – сосредоточенная внешняя сила;  $b$  – ширина балки

Как видно из рисунка 2, при опирании балки на значительном расстоянии от края одной восьмой пространства, крутящие моменты стремительно убывают, и на расстоянии равном  $t = 2b$  (на рисунке 2 показано штриховой), где  $b$  – ширина балки, крутящими моментами можно пренебречь. При этом характер распределения контактных напряжений и вертикальных перемещений становится таким же, как при опирании балки на четвертьпространство, т. е. поставленная задача сводится к задаче, в которой балка опирается слева и справа на упругое четвертьпространство [5].

#### Список литературы

- 1 Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1984. – 680 с.
- 2 Горбунов-Посадов, М. И. Балки и плиты на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов. – М. : Машстройиздат, 1949. – 238 с.
- 3 Жемочкин, Б. Н. Практические методы расчетов фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Госстройиздат, 1962. – 240 с.
- 4 Босаков, С. В. Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. – Минск : БНТУ, 2002. – 128 с.
- 5 Босаков, С. В. Решение пространственной контактной задачи для шарнирного узла опирания однопролетной балки / С. В. Босаков, П. Д. Качёк // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – № 4 (285). – С. 10–19.

УДК 539.3

### РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ МНОГОСЛОЙНОГО ОСТЕКЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

*Н. В. СМЕТАНКИНА, А. И. МЕРКУЛОВА, Д. А. МЕРКУЛОВ, А. В. ПОСТНЫЙ*  
 Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков

Обеспечение эффективной и безопасной эксплуатации спецтехники является одной из важнейших задач при ликвидации последствий техногенных аварий. Для решения этой задачи необходимо обеспечение прочности остекления кабин основных и специальных пожарных автомобилей как одной из наиболее уязвимых частей техники.

Характерной особенностью эксплуатации спецтехники является работа вблизи пожаров и взрывоопасных объектов, что может привести к воздействию значительных силовых и температурных нагрузок. Особо опасной является работа рядом со взрывоопасными объектами, поскольку во время взрыва на спецтехнику действуют кратковременные нагрузки большой интенсивности [1].

Пожарные автомобили предназначены для доставки личного состава, тушения пожаров и проведения спасательных работ. Как правило, пожарные автомобили производятся на базе шасси существующих грузовиков (КамАЗ, ЗИЛ, МАЗ, КрАЗ).

По площади остекление занимает значительную поверхность кабин – 1,8–2,6 м<sup>2</sup>. На многоцелевых автомобилях, как правило, присутствуют по два больших ветровых окна, разделенных центральной стойкой оконного прореза. Наибольшее применение в кабинах нашли плоские стекла. Остекление кабин, как правило, выполнено из закаленных однослойных стекол (сталинита) или трехслойных (триплекса). Толщина всех стекол кабин многоцелевых автомобилей находится в пределах 5,0–6,5 мм.

Закрепление ветровых стекол и стекол задней панели в прорезях осуществляется с помощью резинового уплотнителя, который фиксируется по периметру закладки замком из полимерного материала или резины. В работе [2] установлено, что создание защитного стекла для спецтехники требует комплексного подхода и не допускает упрощенного решения задачи за счет обычного наклеивания многослойной полимерной пленки на стекло, установленное в раме. Показано, что на сегодняшний день триплекс (т. е. многослойный стеклоблок) дешевле стекла с многослойной полимерной пленкой.

Целью работы является разработка эффективных методов расчета прочности безопасного многослойного остекления спецтехники при воздействии нестационарных температурных полей.

Многослойное остекление спецтехники рассматривается как многослойная пластина с неканонической формой плана, которая собрана из слоев постоянной толщины, отнесенная к декартовой системе координат, которая связана с наружной поверхностью первого слоя. На наружных поверхностях пластины происходит конвективный теплообмен. Между слоями находятся межслойные пленочные источники тепла.

Уравнение теплопроводности и граничные условия на внешних поверхностях пластины получаем из вариационного уравнения теплового баланса [3]. Чтобы трехмерную задачу теплопроводности свести к двумерной задаче, температура в слоях и на боковой поверхности, а также удельные мощности внутренних источников тепла представляются в виде разложений в ряды по полиномам Лежандра [4].

Метод решения задачи состоит в следующем. Исходная многослойная пластина произвольной формы в плане погружается во вспомогательную многослойную прямоугольную охватывающую пластину с нулевыми условиями на контуре и с той же композицией слоев. Чтобы обеспечить выполнение реальных граничных условий, к вспомогательной пластине вдоль границы контура исходной пластины прикладываются компенсирующие источники, которые учитываются в уравнении теплопроводности в интегральном виде. Удовлетворение граничных условий на исходном контуре приводит к системе интегральных уравнений для определения распределений компенсирующих источников. Далее функции температуры и внутренних источников разлагаются в двойные тригонометрические ряды по функциям, которые удовлетворяют граничным условиям для прямоугольной пластины. Функции температуры, входящие в граничные условия исходной пластины, разлагаются в одинарный ряд вдоль исходного контура. После определения интенсивностей компенсирующих источников, вычисляются значения температур в слоях пластины. Далее решается несвязанная задача термоупругости многослойных пластин с учетом полученных температурных воздействий.

Деформирование пластины описывается в рамках уточненной теории, учитывающей деформации поперечного сдвига и обжатие материала слоев по толщине. Метод решения задачи термоупругости аналогичен методу решению задачи теплопроводности. Исходная пластина погружается во вспомогательную прямоугольную шарнирно опертую пластину. Для выполнения заданных граничных условий к вспомогательной пластине вдоль контура исходной пластины прикладываются дополнительные распределенные компенсирующие усилия и моменты. Таким образом, исходная задача о деформировании исходной пластины под действием силовой и тепловой нагрузки сводится к задаче о деформировании вспомогательной пластины под действием нагрузок, а также компенсирующих усилий и моментов [5].

Далее функции перемещений, заданных и компенсирующих нагрузок разлагаются в тригонометрические ряды по функциям, которые удовлетворяют условиям шарнирного опирания прямоугольной пластины.

На примере ветровых стекол некоторых типов спецтехники проведено численное исследование температурных полей и напряжений в слоях остекления автомобилей спецтехники. Рассмотрены трехслойные композиции ветровых стёкол для КамАЗ-5320, Урал-432 и КрАЗ-260.

Температура, которая возникает при лесных пожарах, 100–930 °С [6]. При пожарах на нефтебазах, предприятиях химической и нефтехимической промышленности температура повышается до 2000 °С [7, 8].

Установлено, что температура разрушения многослойного остекления составляет 350 °С. Если температура превышает это значение, необходимо использовать специальные пожарные танки или многоцелевые легкие бронированные тягачи, в которых стеклоблоки оборудованы броневыми крышками. При этом наблюдения за дорогой механиком-водителем ведется через смотровые устройства.

Расчётные исследования показали, что температура в стекле для всех типов спецтехники при рассматриваемых условиях не превышает температуры разрушения. То есть остекление не разрушится при таких условиях, однако другие узлы машин могут выйти из строя при значительно меньших температурах. Поэтому во время тушения пожаров необходимо устанавливать безопасную дистанцию, на которой каждый тип спецтехники выдержит температурные нагрузки.

#### Список литературы

- 1 Голяков, В. И. Метод расчета взрывозащитного остекления / В. И. Голяков, А. А. Дайлов, В. А. Кишкин // Системы безопасности. – 2004. – № 4. – С. 26–27.
- 2 Мильков, В. Г. Двухосноориентированная подиэтилентерефталатная пленка. Всегда ли необходима в пулестойком и взрывобезопасном остеклениях? / В. Г. Мильков // Технологии безопасности. – 2004. – № 6. – С. 24–26.
- 3 Smetankina, N. Calculation of temperature fields in multilayer plates and shells with distributed sources / N. Smetankina, O. Postnyi // Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska. – 2020. – Vol. 10, no. 2 – P. 28–31.
- 4 Stationary problem of heat conductivity for complex-shape multilayer plates / A. I. Malykhina [et al.] // Вестник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. Сер. Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления. – 2019. – Т. 41. – С. 46–54.
- 5 Сметанкина, Н. В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек: [монография] / Н. В. Сметанкина. – Харьков: Миськдрук, 2011. – 376 с.
- 6 Валендик, Э. Н. Влияние пожаров на устойчивость хвойных пород / Э. Н. Валендик, А. И. Сухинин, А. И. Косов. – Красноярск, 2006. – 96 с.
- 7 Абрамов, Ю. А. Тепловые процессы в нагреваемом резервуаре / Ю. А. Абрамов, А. Е. Басманов // Коммунальное хозяйство городов. – № 67. – 2006. – С. 357–362.
- 8 Обеспечение пожарной безопасности резервуарного парка хранения нефтепродуктов, расположенного вблизи жилых и общественных зданий / Ю. Н. Шебеко [и др.] // Пожарная безопасность. – 2009. – № 2. – С. 33–41.

УДК 539.3

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЫ ПОГОННЫМИ НАГРУЗКАМИ

Э. И. СТАРОВОЙТОВ

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

**Введение.** Современные требования машиностроения к оценке прочностных характеристик композитных конструкций, работающих в условиях повышенных внешних нагрузок, обуславливают необходимость создания расчетных моделей, описывающих их деформирование в физически нелинейной области при различного вида нагрузках, в том числе погонных. Этой проблеме посвящен ряд публикаций. Колебания неоднородных пластин и оболочек, в том числе при контактном взаимодействии, исследовались в статьях [1–5]. Отдельные задачи квазистатического деформирования упругопластических трехслойных элементов конструкций, в том числе связанных с упругим основанием, при однократных и циклических нагрузках решены в работах [6–14].

Для трехслойного пакета пластины приняты гипотезы ломаной линии. Во внешних несущих слоях несимметричной по толщине ( $h_1 \neq h_2$ ) трехслойной круговой пластины приняты гипотезы



Кирхгофа. В жестком, достаточно толстом ( $h_3 = 2c$ ) заполнителе справедлива гипотеза о прямолинейности и несжимаемости деформированной нормали, которая поворачивается относительно срединной поверхности на дополнительный угол  $\psi(r)$ . Учтена работа заполнителя в тангенциальном направлении. Постановка задачи и ее решение проводится в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ . Срединная плоскость заполнителя принимается за координатную, ось  $z$  направлена перпендикулярно вверх, к первому слою.

К наружной поверхности первого слоя ( $z = c + h_1$ ) приложена нагрузка. В силу ее симметрии тангенциальные перемещения в слоях отсутствуют  $u_\varphi^{(k)} = 0$  ( $k = 1, 2, 3$  – номер слоя). Прогиб пластины  $w$ , относительный сдвиг в заполнителе  $\psi$  и радиальное перемещение координатной поверхности  $u$  не зависят от координаты  $\varphi$ . В дальнейшем эти функции  $w(r), u(r), \psi(r)$  считаются искомыми. Все перемещения и линейные размеры пластины отнесены к ее радиусу  $r_0$ . На контуре предполагается жесткая диафрагма ( $\psi = 0$  при  $r = 1$ ).

Для связи девиаторов и шаровых частей тензоров напряжений и деформаций в слоях используются нелинейные физические уравнения состояния:

$$s_\alpha^{(k)} = 2G_k(1 - \omega_k(\epsilon_u^{(k)}))\epsilon_\alpha^{(k)}, \quad \sigma^{(k)} = 3K_k\epsilon^{(k)},$$

$$s_{rz}^{(3)} = 2G_3(1 - \omega_k(\epsilon_u^{(3)}))\epsilon_{rz}^{(3)} \quad (k = 1, 2, 3; \alpha = r, \varphi),$$

где  $\omega_k(\epsilon_u^{(k)})$  – функции физической нелинейности материалов слоев.

Система уравнений равновесия рассматриваемой трехслойной пластины в случае равномерно распределенной поверхностной нагрузки  $q(r)$  известна. Ее решение при погонной поперечной силе  $Q(r)$  получено методом упругих решений:

$$\psi^{(n)} = C_2^{(n)}I_1(\beta r) + C_3^{(n)}K_1(\beta r) + \psi_r^{(n)},$$

$$w^{(n)} = \frac{b_2}{b_3} \int \psi^{(n)} dr + \frac{a_3}{b_3 a_1} \int L_2^{-1}(p_\omega^{(n-1)}) dr + \frac{1}{b_3} \int L_3^{-1}(Q) dr - \frac{1}{b_3} \int L_3^{-1}(q_\omega^{(n-1)}) dr -$$

$$-\frac{C_1^{(n)}}{4b_3} r^2 (\ln r - 1) + \frac{C_5^{(n)} r^2}{4b_3} + C_6^{(n)} \ln r + C_4^{(n)},$$

где  $n$  – номер приближения;  $a_i, b_i$  – постоянные коэффициенты;  $C_1^{(n)}, \dots, C_8^{(n)}$  – константы интегрирования;  $L_2^{-1}, L_3^{-1}$  – интегральные операторы;

$$\psi_r^{(n)} = \frac{\gamma_1 Q_0 a}{\beta} H_0(a-r) \left( \frac{1}{\beta r} - K_1(\beta r) I_0(\beta a) - I_1(\beta r) K_0(\beta a) \right) + \frac{C_1^{(n)} \gamma_1}{\beta^2 r} -$$

$$-K_1(\beta r) \left[ \frac{b_3}{b_1 b_3 - b_2^2} \left[ \int I_1(\beta r) h_\omega^{(n-1)} r dr - \frac{a_2 b_3 - a_3 b_2}{a_1 b_3} \int I_1(\beta r) p_\omega^{(n-1)} r dr \right] - \gamma_1 \int I_1(\beta r) \left( \int q_\omega^{(n-1)} r dr \right) dr \right] +$$

$$+ I_1(\beta r) \left[ \frac{b_3}{b_1 b_3 - b_2^2} \left[ \int K_1(\beta r) h_\omega^{(n-1)} r dr - \frac{a_2 b_3 - a_3 b_2}{a_1 b_3} \int K_1(\beta r) p_\omega^{(n-1)} r dr \right] - \gamma_1 \int K_1(\beta r) \left( \int q_\omega^{(n-1)} r dr \right) dr \right];$$

$$\int L_3^{-1}(Q) dr = \frac{Q_0 a}{4} \left( r^2 - a^2 - a^2 \ln \left( \frac{r}{a} \right) - r^2 \ln \left( \frac{r}{a} \right) \right) H_0(a-r).$$

Величины  $p_\omega^{(n-1)}, h_\omega^{(n-1)}, q_\omega^{(n-1)}$  называют «дополнительными» внешними нагрузками, они на первом шаге полагают равными нулю, а в дальнейшем вычисляют по результатам предыдущего приближения. Если на пластину действуют погонные моменты интенсивности  $M_0 = \text{const}$ , распределенные по окружности радиуса  $r = a$ , то решение задачи можно получить, используя разность приведенных выше решений.

Полученные решения позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние трехслойных круговых пластин при погонных силовых и моментных нагрузках. Численные результаты показали существенное влияние физической нелинейности материалов слоев на перемещения в пластине.

*Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект № T20P-047).*

## Список литературы

- 1 Starovoirov, É. I. Resonant effects of local loads on circular sandwich plates on an elastic foundation / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 46, no. 1. – P. 86–93.
- 2 Starovoirov, É. I. Circular sandwich plates under local impulsive loads / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaia // International Applied Mechanics. – 2003. – Vol. 39, no. 8. – P. 945–952.
- 3 Starovoirov, É. I. Vibrations of circular sandwich plates under resonant loads / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaia // International Applied Mechanics. – 2003. – Vol. 39, no. 12. – P. 1458–1463.
- 4 Леоненко, Д. В. Колебания элементов авиационных конструкций, возбужденные тепловым воздействием / Д. В. Леоненко, Л. Н. Рабинский, Э. И. Старовойтов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2016. – № 4. – С. 25–32.
- 5 Леоненко, Д. В. Радиальные собственные колебания упругих трехслойных цилиндрических оболочек / Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 3 (12). – С. 53–56.
- 6 Starovoirov, É. I. Thermoelastic bending of a sandwich ring plate on an elastic foundation / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2008. – Vol. 44, no. 9. – P. 1032–1040.
- 7 Старовойтов, Э. И. Термосиловое нагружение трехслойных пологих оболочек / Э. И. Старовойтов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1989. – № 5. – С. 114–119.
- 8 Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов / Э. И. Старовойтов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 384 с.
- 9 Захарчук, Ю. В. Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – № 10 (10). – С. 55–66.
- 10 Захарчук, Ю. В. Влияние сжимаемости наполнителя на перемещения в трёхслойной круговой симметричной пластине / Ю. В. Захарчук // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – № 2. – С. 14–27.
- 11 Козел, А. Г. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11 (11). – С. 127–133.
- 12 Козел, А. Г. Влияние сдвиговой жёсткости основания на напряжённое состояние сэндвич пластины / А. Г. Козел // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 6 (332). – С. 25–34.
- 13 Нестерович, А. В. Напряжения в круговой пластине типа Тимошенко при неосесимметричном растяжении-сжатии / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11 (11). – С. 195–203.
- 14 Нестерович, А. В. Напряженное состояние круговой трехслойной пластины при осесимметричном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – № 12 (12). – С. 152–157.

УДК 539.37

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ИЗГИБЕ ПОДАТЛИВОЙ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ СДВИГ ДЛИННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ ОВАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Е. А. СТОРОЖУК

*Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев*

Композитные цилиндрические оболочки переменной кривизны находят широкое применение в различных отраслях техники как конструктивные элементы машин и приборов. Высокие требования к точности и достоверности результатов исследований указанных элементов конструкций требуют кроме учета действительных условий эксплуатации, также и учета особенностей их деформирования (деформаций поперечного сдвига).

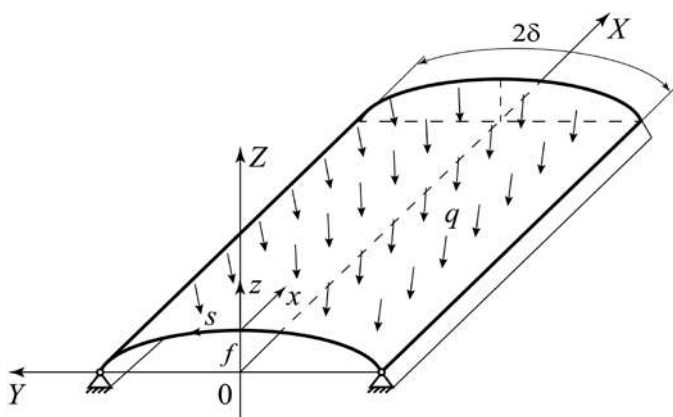


Рисунок 1 – Цилиндрическая панель овального поперечного сечения

Рассмотрим незамкнутую бесконечно длинную пологую цилиндрическую оболочку овального поперечного сечения постоянной толщины  $h$ , изготовленную из трансверсально-изотропного материала (рисунок 1). Для описания геометрии оболочки введем декартовую систему координат  $(X, Y, Z)$ , ось  $OX$  которой параллельна образующей. Плоскость поперечного сечения оболочки отнесем к системе координат  $(Y, Z)$ , а срединную поверхность – к криволинейной ортогональной системе координат  $(x, s)$ , сопряженной с линиями главных кривизн. Предполагаем, что оболочка имеет постоянные жесткостные характеристики  $D_N, D_M, D_Q$  и нагружена равномерным нормальным давлением интенсивности  $q = \text{const}$ . Из изложенного выше следует, что перемещения, деформации и напряжения в каж-

дом поперечном сечении оболочки будут одинаковыми, а все искомые величины будут изменяться только вдоль направляющей (будут зависеть только от координаты  $s$  ( $-\delta \leq s \leq \delta$ )).

Примем, что кривизна поперечного сечения оболочки изменяется по закону

$$k = \frac{1}{r_0} \left( 1 - \xi \cos \frac{2s}{r_0} \right), \quad (1)$$

где  $r_0 = \frac{a+b}{2}$  – радиус окружности, длина которой равна длине овала;  $a, b$  – полуоси поперечного сечения;  $\xi = \frac{3(a-b)}{a+b}$ .

Исходными при исследовании напряженно-деформированного состояния данного класса нетонких цилиндрических оболочек являются уравнения теории пологих оболочек, которая базируется на гипотезе прямой линии (учитываются деформации поперечного сдвига). В этом случае для геометрических соотношений имеем выражения:

$$\varepsilon = \frac{du}{ds} + kw; \quad \gamma = \vartheta + \frac{dw}{ds}; \quad \mu = \frac{d\vartheta}{ds}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon, \gamma, \mu$  – компоненты деформации оболочки;  $u, w$  – тангенциальное перемещение и прогиб точек срединной поверхности оболочки;  $\vartheta$  – угол поворота нормали.

Связь внутренних усилий ( $N, Q$ ) и момента ( $M$ ) с компонентами деформации оболочки записываем согласно закону Гука в виде:

$$\begin{aligned} N = D_N \varepsilon; \quad D_N = \frac{Eh}{1-\nu^2}; \quad Q = D_Q \gamma; \quad D_Q = m G_{yz} h; \\ M = D_M \mu; \quad D_M = D_N h^2 / 12. \end{aligned} \quad (3)$$

В соотношениях (3) обозначено:  $E, \nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки в плоскости изотропии;  $G_{yz}$  – модуль сдвига в плоскости поперечного сечения;  $m$  – коэффициент, который зависит от характера распределения сдвига по толщине.

Уравнения равновесия имеют следующий вид:

$$\frac{dN}{ds} = 0; \quad \frac{dQ}{ds} - kN + q = 0; \quad \frac{dM}{ds} - Q = 0. \quad (4)$$

Интегрируя последовательно уравнения равновесия (4) и геометрические соотношения (2), получаем аналитическое (точное) решение данной задачи:

$$\begin{aligned} N = C_1; \quad Q = \frac{C_1}{r_0} \left( s - \frac{r_0 \xi}{2} \sin \frac{2s}{r_0} \right) - qs + C_2; \quad M = \frac{C_1}{r_0} \left( \frac{s^2}{2} + \frac{r_0^2 \xi}{4} \cos \frac{2s}{r_0} \right) - \frac{qs^2}{2} + C_2 s + C_3; \\ \vartheta = \frac{1}{D_M} \left[ \frac{C_1}{r_0} \left( \frac{s^3}{6} + \frac{r_0^3 \xi}{8} \sin \frac{2s}{r_0} \right) - \frac{qs^3}{6} + \frac{C_2 s^2}{2} + C_3 s \right] + C_4; \\ w = \frac{1}{D_Q} \left[ \frac{C_1}{r_0} \left( s - \frac{r_0 \xi}{2} \sin \frac{2s}{r_0} \right) - qs + C_2 \right] - \\ - \frac{1}{D_M} \left[ \frac{C_1}{r_0} \left( \frac{s^4}{24} - \frac{r_0^4 \xi}{16} \cos \frac{2s}{r_0} \right) - \frac{qs^4}{24} + \frac{C_2 s^3}{6} + \frac{C_3 s^2}{2} \right] - C_4 s + C_5. \end{aligned} \quad (5)$$

В соотношениях (5) не приведено выражение для тангенциального перемещения  $u$ , поскольку оно является громоздким и, как правило, не представляет практического интереса.

Постоянные интегрирования определяем из граничных условий на продольных краях оболочки.

Нормальные напряжения вдоль направляющей на внешней (верхней) и внутренней (нижней) поверхностях оболочки вычисляются по формулам:

$$\sigma^\pm = \frac{N}{h} \pm \frac{6M}{h^2} = \frac{C_1}{h} \pm \frac{6}{h^2} \left[ \frac{1}{r_0} \left( \frac{s^2}{2} + \frac{r_0^2 \xi}{4} \cos \frac{2s}{r_0} \right) C_1 - \frac{qs^2}{2} + C_2 s + C_3 \right]. \quad (6)$$

Отметим, что при  $D_0 \rightarrow \infty$  из формул (5) вытекает решение соответствующей задачи для оболочки Кирхгофа – Лява.

Таким образом, в работе получены точные выражения для обобщенных перемещений, нормальных напряжений, внутренних усилий и момента незамкнутой цилиндрической оболочки овального поперечного сечения при действии поверхностной нагрузки, которые имеют как самостоятельное значение, так и могут быть эталоном для приближенных и численных методов.

УДК 656.078

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

*Т. О. СУНДУКОВА, Г. В. ВАНЬКИНА*

*Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, Российская Федерация*

Инновация на транспорте или новая категория, которая называется «интеллектуальный транспорт», «умный транспорт» (Smart Transportation), является одним из приоритетных направлений повседневной жизни, особенно в современной городской инфраструктуре, когда передовые технологии доступны почти каждому члену социума. Многие умные транспортные приложения становятся привычными, работают в любое время и обслуживают как водителей, так и пассажиров. В судоходном и авиационном секторах, которые в основном активно работают на международной арене, уже используются специализированные интеллектуальные транспортные системы. Каждая новая технология приносит с собой потребность в новом стандарте, мероприятия по стандартизации в наше время иногда не успевают за скоростью развития технологии [1]. В таких условиях соблюдение требований принятых стандартов имеет важное значение для эффективной работы, при этом развитие и обновление стандартов имеет важное значение для соблюдения требований.

Применение интеллектуальных транспортных систем в мировом масштабе и в каждой отдельной стране в основном сосредоточено на управлении автодорожным движением, обеспечении безопасности дорожного движения и автоматическом сборе сведений о логистике, транспортных потоках, загруженности магистралей, нарушениях. В последнее время на повестку дня встали заявки региональных муниципалитетов на поддержку систем общественного транспорта. Согласно международной дорожной Федерации (International Road Federation – IRF), цели интеллектуальной транспортной системы определяются следующим образом: безопасные дороги и безопасное вождение; достижение устойчивого автомобильного транспорта, сбор данных, передача данных, обработка и анализ; формирование и принятие решений [5]. В контексте поставленных целей существует ряд прямых и косвенных выгод, ожидаемых от интеллектуальной транспортной системы: снижение дорожно-транспортных происшествий; повышение безопасности и защищенности дорог, водителей и пешеходов; повышение эффективности работы транспортной системы и снижение пробок на дорогах; мониторинг, руководство и управление движением в режиме реального времени; оптимизация времени транспортировки и вклад в экономику за счет снижения транспортных издержек; повышения качества обслуживания и производительности труда; повышение личной мобильности и комфорта; минимизация ущерба, наносимого окружающей среде; экономия энергии. Перечисленные преимущества показывают важность интеллектуальной транспортной системы.

Рассмотрим основные концепции интеллектуальных транспортных систем.

**Концепция 1.** Передовые системы управления дорожным движением, собирающие и анализирующие данные о плотности движения и задержках в городских районах посредством установки дорожных камер и дорожных датчиков, которые будут передаваться в транспортные центры, чтобы уменьшить заторы в мегаполисах. Центры управления будут информировать водителей о неожиданных обстоятельствах, вызывающих заторы, и направлять их на наиболее подходящий маршрут для достижения пункта назначения самым быстрым способом через систему переменных сообщений, которая может предоставлять мгновенные сообщения в режиме реального времени. Динамические светофоры, управляемые на основе базы данных дорожных центров, обеспечат эффективный транспортный поток в перегруженных районах за счет использования мгновенной информации о дорожном движении в час пик и информации о техническом обслуживании дорог [3]. Динамическая система запрограммирует гибкое световое время для наиболее часто используемого перекрестка, изменение движения в часы пик, приоритизацию аварийных транспортных средств и автобусов.

**Концепция 2.** В управлении дорожным движением административным центром является электронная система обнаружения, которая может выявлять транспортные средства, нарушающие правила, с помощью установленных камер и датчиков. Такой тип обнаружения снизит рабочую нагрузку государственных должностных лиц и обеспечит большую подотчетность в работе системы за счет минимизации коррупции и фаворитизма, поскольку каждый автомобиль будет равноправен и изначально обезличен в электронной системе. Наиболее известными примерами электронных систем обнаружения являются красный свет и система контроля скорости.

**Концепция 3.** Электронные системы ценообразования на перевозки, которые будут использоваться правительством для обеспечения последовательного сбора платежей за счет использования автоматизированных кабин взимания платы. Такая система работает с радиочастотной идентификацией, в ней транспортные средства оснащены чипом, который содержит данные о транспортном средстве, в частности, номер, тип и вес, денежный счет для оплаты своих сборов. Система направлена на минимизацию задержки на автомагистралях, собирая платежи в цифровом виде. Система определяет, зарегистрированы ли проезжающие транспортные средства в программе, информирует о незарегистрированных транспортных средствах, автоматически списывает деньги, не требуя остановки транспортных средств.

**Концепция 4.** Система управления грузовыми перевозками основана на интеллектуальных транспортных проектах, которые были реализованы во всем мире для решения основных проблем, вызванных традиционными методами транспортировки грузов, которые не имеют технологической инфраструктуры. Существуют определенные проблемы, связанные с традиционными методами логистики, такими как пробки на дорогах, высокий уровень выбросов углекислого газа, неэффективные расходы на эксплуатационные потребности, скудные ресурсы, в частности, топливо, отсутствие отбора и анализа данных из-за специфики области.

**Концепция 5.** Система транспортной инфраструктуры – это концепция, на которую повлияло быстрое технологическое развитие. Управление фрахтом в настоящее время полностью зависит от GPS для доставки информации об отправке на мгновенной базе для поддержания эффективного и действенного управления передачей.

Быстрые и радикальные изменения в мире и изменения в транспортных системах в мировом масштабе, приводят к модернизации основных направлений развития транспортной инфраструктуры [2]. Следует создать измерительные инструменты и системы для проведения мониторинга, а также собрать сведения и определить статистические данные. Должна быть создана интеллектуальная транспортная система, персонал должен пройти обучение на пользовательском уровне. Динамические решения должны вводиться в соответствии с изменяющимися условиями. Транснациональные заявки должны быть рассмотрены, данные должны быть обменены, их опыт и ошибки должны быть проанализированы и учтены. Не следует забывать, что приоритетом при этом является безопасность людей, поэтому политика модернизации должна определяться в соответствии с приоритетами. Интеграция интеллектуальной системы в автомобили началась с разработки круиз-контроля и антиблокировочной тормозной системы, снижающей нагрузку на водителя [4]. Затем эти системы расширились до системы экстренного торможения и электронного контроля устойчивости. В настоящее время интеллектуальная транспортная система продвинулась достаточно далеко, что позволяет существовать самоуправляемому транспортному средству, которое анализирует и обрабатывает данные о дорожном движении, погоде, которые не требовали бы от водителя путешествовать. В большинстве мегаполисов по всему миру, которые пострадали от экономического бремени общественного транспорта, были преобразованы метро и автобусные системы с помощью самоавтоматизированных транспортных средств. Дальнейшее развитие умных транспортных систем должно идти параллельно с процессами технологического и технического развития, а также с мониторинговыми миссиями выявления и устранения возможных рисков.

#### Список литературы

1 Akıllı Ulaşım Sistemleri [Electronic recourse]. – January, 2016. – Mode of access : <http://muhendislik.istanbul.edu.tr/insaat/wp-content/uploads/2016/12/Hafta-7-Ak%C4%B1ll%C4%B1-Ula%C5%9F%C4%B1m-Sistemleri.pdf> – Data of access : 09.09.2020.

2 Department of Transportation, DoE. Smart City Challenge [Electronic recourse]. – June 29, 2017. – Mode of access : <https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/Smart%20City%20Challenge%20Lessons%20Learned.pdf>. – Data of access : 28.08.2020.

3 The rise of mobility as a service / W. Goodall [et al.] // Deloitte Rev. – 2017. – Vol. 20. – P. 112–129.

4 **Tufan, H.** Akıllı Ulaşım Sistemleri Uygulamaları ve Türkiye için bir AUS Mimarisi Önerisi / H. Tufan // Ulaştırma ve Haberleşme Uzmanlığı Tezi, TC Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı. – 2014.

5 **Turner, B.** International Road Federation (IRF) / B. Turner // The Statesman's Yearbook. – Palgrave Macmillan, London, 2012. – P. 48–49.

## **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПЛИТОК, ЛЕЖАЩИХ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ТЕРМОСИЛОВЫХ НАГРУЗОК**

*О. В. ТУШАВИНА*

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Построена математическая модель, позволяющая определить напряженно-деформированное состояние керамической плиточной конструкции из композиционного материала с учетом образования жидкости при повышенных температурах или льда, образовавшегося в межплиточных зазорах в процессе обледенения. В результате исследований получены значения прогиба, сдвига и нормальных напряжений в конструкции, что необходимо для расчёта прочности и работоспособности плиточной тепловой защиты на активных этапах полёта космического летательного аппарата.

Поставленная задача моделируется краевой задачей о деформировании круговой композитной пластины, связанной с упругим основанием. Учтено воздействие температурного поля. Материал пластины моделируется трехслойным композитом с легким наполнителем. Для описания кинематики несимметричного по толщине пакета пластины приняты гипотезы ломаной нормали. В тонких несущих слоях справедливы гипотезы Кирхгофа. В относительно толстом наполнителе нормаль не изменяет своей длины, остается прямолинейной, но поворачивается на некоторый дополнительный угол. Реакция основания описывается моделью Винклера. Получена система уравнений равновесия и ее решение в перемещениях. Проведен численный параметрический анализ решения.

Работа обусловлена необходимостью изучения напряженно-деформированного состояния и прочности теплозащитных плиток при обледенении является одним из важнейших при хранении и транспортировке изделия в открытых атмосферных условиях, так как содержащаяся в порах теплоизоляции влага при замерзании образует значительные усилия, способные не только повредить, но и разрушить систему тепловой защиты, затем при аэродинамическом нагреве в полете такое повреждение может вызвать аварийную ситуацию или полное разрушение космического аппарата. Поэтому необходимость изучения напряженно-деформированного состояния и прочности теплозащитных плиток при обледенении является одним из важнейших при хранении и транспортировке изделия в открытых атмосферных условиях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ код проекта FSFF-2020-0016.*

## **ОБРАТНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ НАГРУЗКИ ДЛЯ БАЛКИ ТИМОШЕНКО КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ**

*Г. В. ФЕДОТЕНКОВ, Я. А. ВАХТЕРОВА*

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

Основной целью исследований является получение решений новых нестационарных обратных задач для упругих стержней. Задачей данного исследования является разработка и реализация новых методов, подходов и алгоритмов решения нестационарных обратных задач механики стержней.

Рассматривается упругий однородный изотропный стержень конечной длины, левый конец которого жестко закреплен, правый конец стержня свободный. В начальный момент времени на стержень начинает воздействовать распределенная нестационарная нагрузка, зависимость которой от времени и закон распределения по координате неизвестны и подлежат определению в

процессе решения обратной задачи. Предполагается, что в некоторой окрестности свободного конца стержня перемещения известны. На практике эта информация может поступать с датчиков измерения продольных перемещений, установленных в нескольких сечениях в окрестности свободного конца стержня. Для построения метода решения обратной задачи требуется сначала получить решения прямой задачи, в которой осевая нагрузка известна и требуется определить нестационарные перемещения для упругого стержня. В основу методики решения прямой задачи положен принцип суперпозиции [1], при котором перемещения и контактные напряжения связаны посредством интегральных операторов по пространственной переменной и времени. При этом ядрами последних являются так называемые функции влияния. Эти функции представляют собой фундаментальные решения систем дифференциальных уравнений движения исследуемой балки. Их построение представляет собой отдельную задачу. Функции влияния находятся с помощью преобразования Лапласа по времени и разложений в ряды Фурье по системе собственных функций.

В обратных задачах не задана правая часть в уравнениях нестационарных колебаний, но зато имеется некоторая информация о перемещениях в точках установки датчиков. С применением метода функций влияния обратная задача сводится к решению системы интегральных уравнений типа Вольтера I-го рода по времени относительно коэффициентов разложения искомой нагрузки в ряд Фурье по системе собственных функций. Для решения интегральных уравнений используется метод механических квадратур в сочетании с алгоритмом регуляризации Тихонова [2–6]. Исследованы возможности применения предложенного метода идентификации при наличии зашумленности измерений.

Следует отметить, что наряду с множеством работ, направленных на решение теоретически и практически важных прямых задач для тонкостенных элементов конструкций, например, работы [7] – [12], в том числе, с учётом воздействия температуры, анизотропии материала, многослойности строения элементов, практически отсутствуют публикации, посвящённые решению нестационарных обратных задач. Это обуславливает актуальность тематики данной работы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 20-38-90043).*

#### Список литературы

- 1 Волны в сплошных средах / А. Г. Горшков [и др.]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с.
- 2 **Вахтерова, Я. А.** Обратная задача об идентификации нестационарной нагрузки для балки Тимошенко / Я. А. Вахтерова, Е. В. Серпичева, Г. В. Федотенков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 4. – С. 82–92.
- 3 **Fedotenko, G. V.** Identification of non-stationary load upon Timoshenko beam / G. V. Fedotenko, D. V. Tarlakovsky, Y. A. Vahterova // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – Vol. 40, no. 4. – P. 439–447. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995080219040061>.
- 4 **Hadamard, J.** Le probleme de Cauchy et les equations aux derivers particee lineaires hyperbolique / J. Hadamard. – Paris : Hermann, 1932.
- 5 **Тихонов, А. Н.** Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – 2-е изд. – М. : Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1979. – С. 285.
- 6 Численные методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов [и др.]. – М. : Наука, 1990. – С. 232.
- 7 **Маркова, Е. В.** Численные методы решения неклассических линейных уравнений Вольтерра I рода и их приложения / Е. В. Маркова. – Иркутск, 1999. – С. 100.
- 8 **Старовойтов, Э. И.** Влияние жесткости основания Пастернака на деформирование круговой трёхслойной пластины / Э. И. Старовойтов, А. Г. Козел // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 2. – С. 25–35.
- 9 **Okonechnikov, A. S.** Transient Interaction of Rigid Indenter with Elastic Half-plane with Adhesive Force / A. S. Okonechnikov, D. V. Tarlakovsky, G. V. Fedotenko // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – Vol. 40, no. 4. – P. 489–498. – DOI: [10.1134/S1995080219030132](https://doi.org/10.1134/S1995080219030132).
- 10 **Lokteva, N. A.** Analysis of vibration insulation properties of a plate in an elastic medium under the influence of different types of waves / N. A. Lokteva, D. V. Tarlakovskii // Proceedings of the Second International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics. – Structural Integrity. – Springer Nature Switzerland AG 2019. – 2019. – P. 298–303. – DOI: [10.1007/978-3-030-21894-2\\_55](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21894-2_55).
- 11 **Lokteva, N. A.** Interaction of a Spherical Wave with a Rectangular Plate in a ground / N. A. Lokteva, D. V. Tarlakovskii // Recent Developments in the Theory of Shells. – Vol. 110 of Advanced Structured Materials. – Springer Nature Switzerland AG 2019. – 2019. – P. 443–458. – DOI: [10.1007/978-3-030-17747-8\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-17747-8_23).
- 12 Transient reaction of an elastic half-plane on a source of a concentrated boundary disturbance / A. S. Okonechnikov [et al.] // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 158(1). – doi:[10.1088/1757-899X/158/1/012073](https://doi.org/10.1088/1757-899X/158/1/012073).

**НЕСТАЦИОНАРНАЯ ДИНАМИКА ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ  
С УЧЕТОМ ИХ СВЯЗИ С ДЕФОРМИРУЕМЫМИ ОСНОВАНИЯМИ***Г. В. ФЕДОТЕНКОВ**Московский авиационный институт (НИИ),  
НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Российская Федерация**Д. В. ЛЕОНЕНКО, Э. И. СТАРОВОЙТОВ**Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель**Е. Ю. МИХАЙЛОВА**Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация*

Создание математических моделей и методов, позволяющих адекватно описывать динамические процессы деформирования тонкостенных элементов конструкций, связанных с деформируемыми основаниями, является в настоящее время одной из важных и актуальных задач механики деформируемого твердого тела. Известные публикации по решению контактных задач для тонкостенных элементов конструкций, связанных с деформируемыми основаниями, ограничиваются рассмотрением статических или стационарных задач. Нестационарные задачи мало исследованы. И зачастую их решения приводятся на уровне изображений.

Практическая значимость и актуальность задач данного класса обуславливается широким применением в современной технике элементов конструкций с покрытиями. Тела с покрытиями в настоящее время составляют широкий и весьма распространённый тип современных материалов. Различного рода покрытия и накладки широко используются в целях повышения прочностных свойств материалов, надёжности и долговечности конструкций. Исследование напряженного состояния горных пород также сводится к задачам для упругих сред с покрытиями, в качестве которых могут рассматриваться мембраны и пластины. В настоящее время запросы современной авиационной, космической, автомобильной, судостроительной и других отраслей промышленности ставят перед учеными и инженерами всё более сложные задачи теории тел с покрытиями. Вследствие необходимости проведения расчетов конструкций, находящихся в условиях высокоинтенсивных физико-механических процессов, направление исследований напряженно-деформированного состояния тел с покрытиями всё больше смещается в область динамических и нестационарных задач. Наличие покрытия может существенно влиять на процессы распространения возмущений и развитие деформаций. Задачи о нестационарных колебаниях балок, связанных с деформируемыми основаниями, является чрезвычайно актуальными для железнодорожной отрасли. Это связано с бурным развитием высокоскоростного железнодорожного транспорта. При этом важное значение имеет качество железнодорожных путей, основу которых, по сути, составляют балки (рельсы), контактирующие с деформируемым основанием. Поэтому исследование нестационарного поведения тонкостенных элементов конструкций, связанных с деформируемыми основаниями, актуально и имеет большое теоретическое и прикладное значение.

В настоящей работе исследуются волновые процессы в тонкостенных элементах конструкций с учетом их связи с деформируемыми основаниями. В качестве моделей оснований выступают основание Винклера, Пастернака, а также сплошная упругая среда [1–5].

Для исследования волновых процессов в тонкостенных элементах конструкций с учетом их связи с деформируемыми основаниями использован общий подход, базирующийся на принципе суперпозиции и методе функций влияния [6–10]. Он состоит в сведении исходной замкнутой математической постановки соответствующих начально-краевых задач с разрешающим интегральным соотношением. Ядрами входящих в них интегральных операторов будут являться нестационарные функции влияния для тонкостенных элементов конструкций, связанных с деформируемыми основаниями.

Для построения функций влияния решены отдельные, важные в теоретическом и прикладном отношении задачи. При этом полученные результаты имеют аналитический вид. Для их получения использованы интегральные преобразования Лапласа по времени, Фурье и Ханкеля по пространственным координатам, а также разложения в ряды по системам собственных функций. Для построения оригиналов использованы как известные аналитические методы обращений интегральных преобразований, так и новые оригинальные методы обращения. Среди которых модификация мето-



да совместного обращения интегрального преобразования Фурье – Лапласа, основанная на аналитическом представлении оригинала, а также метод обращения совместных интегральных преобразований Фурье – Лапласа и Ханкеля – Лапласа, основанный на связи соответствующих интегральных преобразований с разложениями в ряды на переменном интервале.

Для построения решений задач о нестационарных воздействиях на тонкостенные элементы конструкций, связанные с упругими и деформируемыми основаниями, будут разработаны оригинальные численно-аналитические методы и алгоритмы.

В результате разработаны постановки и методы решения новых нестационарных задач для мембран балок и пластин, связанных с деформируемыми основаниями, в качестве которых выступают основание Винклера, Пастернака, а также сплошная упругая среда.

Построены функции влияния для мембран, балок и пластин, связанных с деформируемыми основаниями Винклера и Пастернака и разработаны методы решения нестационарных задач о распространении упругих волн в тонкостенных элементах конструкций, связанных с деформируемыми основаниями.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 20-58-00023 Бел\_а и 20-08-01099 А) и БРФФИ (проект T20P-047).*

#### Список литературы

- 1 Старовойтов, Э. И. Изгиб упругой трехслойной круговой пластины на основании Пастернака / Э. И. Старовойтов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 392–406.
- 2 Starovoitov, E. I. Vibrations of circular composite plates on an elastic foundation under the action of local loads / E. I. Starovoitov, D. V. Leonenko // Mechanics of Composite Materials. – 2016. – Vol. 52 (5). – P. 665–672. – DOI: 10.1007/s11029-016-9615-y.
- 3 Starovoitov, E. I. Resonance Vibrations of a Circular Composite Plates on an Elastic Foundation / E. I. Starovoitov, D. V. Leonenko, D. V. Tarlakovsky // Mechanics of Composite Materials. – 2015. – Vol. 51 (5). – P. 561–570. – DOI: 10.1007/s11029-015-9527-2.
- 4 Starovoitov, E. I. Resonant effects of local loads on circular sandwich plates on an elastic foundation / E. I. Starovoitov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 46 (1). – P. 86–93. – DOI: 10.1007/s10778-010-0285-5.
- 5 Starovoytov, E. I. Cylindrical bending of an elastic rectangular sandwich plate on a deformable foundation / E. I. Starovoytov, E. P. Dorovskaya, S. A. Starovoytov // Mechanics of Composite Materials. – 2010. – Vol. 46 (1). – P. 57–68. – DOI: 10.1007/s11029-010-9126-1.
- 6 Fedotenkov, G. V. Three-Dimensional Non-stationary Motion of Timoshenko-Type Circular Cylindrical Shell / G. V. Fedotenkov, V. V. Kalinchuk, A. Y. Mitin // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – Vol. 40, no. 3. – P. 311–320. – <https://doi.org/10.1134/S1995080219030107>.
- 7 Okonechnikov, A. S. Transient Interaction of Rigid Indenter with Elastic Half-plane with Adhesive Force / A. S. Okonechnikov, D. V. Tarlakovsky, G. V. Fedotenkov // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – Vol. 40, no. 4. – P. 489–498. – DOI: 10.1134/S1995080219040115.
- 8 Fedotenkov, G. V. Identification of Non-stationary Load Upon Timoshenko Beam / G. V. Fedotenkov, D. V. Tarlakovsky, Y. A. Vahterova // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2019. – Vol. 40, no. 4. – P. 439–447. – DOI: 10.1134/S1995080219040061.
- 9 Mihajlova, E. Yu. A Generalized Linear Model of Dynamics of Thin Elastic Shells / E. Yu. Mihajlova, D. V. Tarlakovskii, G. V. Fedotenkov // Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya fiziko-matematicheskie nauki. – 2018. – Vol. 160, no. 3. – P. 561–577.
- 10 Mikhailova, E. Y. Transient contact problem for spherical shell and elastic half-space / E. Y. Mikhailova, G. V. Fedotenkov, D. V. Tarlakovskii // Shell Structures: Theory and Applications. Vol. 4 – Proceedings of the 11th International Conference on Shell Structures: Theory and Applications. SSTA. – 2017. – P. 301–304. – DOI: 10.1201/9781315166605-67.

УДК 656.254

## К ВОПРОСУ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Ю. Н. ХАРИТОНОВ

*Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва*

Основным документом, регламентирующим предельные воздействия электромагнитных полей на организм человека, являются «Санитарные правила и нормативы» изданные в 2003 году [1–3]. Согласно этим документам допускается воздействие магнитного поля промышленной частоты напряженностью 80 А/м в течение рабочего дня, то есть в течение 8 часов, при общем воздействии.

Одними из наиболее мощных источников магнитных полей промышленной частоты являются кабельные линии высокого напряжения (КЛ ВН). Наибольшему воздействию магнитных полей, инициируемых кабельными линиями, подвергается персонал, занимающийся ремонтом этих линий электропередач под напряжением. При проведении таких работ человек может находиться в непо-

средственной близости от токоведущих частей и подвергаться наибольшему воздействию магнитного поля. В связи с этим весьма актуальными является конструирование и прокладка КЛ ВН, отвечающие минимальным интенсивностям магнитных полей по их трассам.

Задача расчета и минимизации магнитных полей, возникающих при эксплуатации КЛ ВН в тоннелях, является актуальной в связи с интенсивным строительством метрополитенов. Используемые ранее маслonaполненные кабели (МНК), так же, как и кабели с бумажно-пропитанной изоляцией, имели достаточно узкую область применения из-за своих конструктивных особенностей и технических характеристик. За счет относительно небольших рабочих токов в маслonaполненных кабелях и применения трехфазных кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией, напряженность магнитных полей по их трассам была мала. Область применения кабелей с появлением изоляции из сшитого полиэтилена существенно расширилась за счет больших значений рабочих токов. Конструктивное исполнение таких кабелей в подавляющем большинстве случаев одножильное. Поэтому напряженности магнитных полей, инициируемых КЛ ВН с изоляцией из сшитого полиэтилена, могут иметь достаточно большое значение.

Для снижения интенсивности магнитных полей кабельных линий существенным является способ заземления экрана. Наибольшая интенсивность магнитного поля, инициируемого КЛ однофазного исполнения, возникает как при одностороннем заземлении экрана, так и при его двухстороннем заземлении в случае транспозиции экранов трех фаз по трассе КЛ. Влияние магнитного поля (МП) многоцепных КЛ ВН показано на рисунке 1.

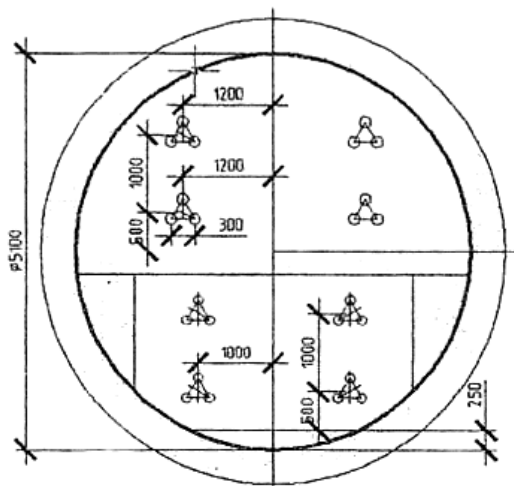


Рисунок 1 – К анализу МП КЛ ВН

В бетонном тоннеле диаметром 5,1 м прокладываются восемь цепей КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Четыре цепи 500 кВ находятся в верхней части тоннеля, четыре цепи 220 кВ прокладываются в его нижней части. Максимальные мощности, передаваемые по КЛ 500 и 220 кВ составляют 5160 и 1370 МВт, соответственно. При этом в нормальном режиме в работе находятся по три цепи каждого класса напряжения. Экраны фаз КЛ заземлены с обеих сторон при одном цикле их транспозиции трассе.

При профилактическом осмотре КЛ персонал непосредственно подвергается воздействию магнитного поля. В качестве основного оцениваемого параметра выбрано значение магнитной индукции вдоль вертикальной оси тоннеля, так как это наиболее вероятное место расположения человека при осмотре.

На величину магнитной индукции при нормальном режиме работы в рассматриваемой конструкции влияют её следующие характеристики: расстояние между фазами в каждой цепи (в диапазоне от 0 до 40 см), фазировка напряжений на кабелях и количество эксплуатируемых цепей. При этом следует отметить, что прокладка фаз кабелей вплотную недопустима с точки зрения обеспечения безопасного теплового режима.

Рассчитанные значения магнитной индукции в тоннеле превышают европейский и российский нормативы: 100 мкТл при времени пребывания в зоне магнитного поля в течение рабочего дня. Следовательно, при осмотре КЛ необходимо ограничивать время пребывания персонала в тоннеле, даже если следовать приведенным выше завышенным нормативам

Магнитная индукция имеет два характерных пика в верхней и нижней частях тоннеля. Именно эти максимальные значения характеризуют интенсивность воздействия магнитного поля на организм человека. Зависимость максимальных значений магнитной индукции от расстояния между кабелями цепи проиллюстрирована в таблице 1.

Таблица 1 – Максимальные значения магнитной индукции в зависимости от расстояния между кабелями цепи

Расстояние между кабелями, см	Максимальное значение магнитной индукции, мкТл	
	Верхняя часть тоннеля	Нижняя часть тоннеля
0	159	95
30	298	213
40	390	286

Как видно из таблицы 1, значение магнитной индукции увеличивается примерно в 2,5 раза при разнесении фаз кабелей на расстояние 40 см, по сравнению с их прокладкой вплотную.

Таким образом, наиболее действенными мерами снижения магнитных полей КЛ ВН является:

- 1 Расположение проводов и кабелей каждой цепи в вершинах треугольника и максимально возможное их сближение.
- 2 Для многоцепных конструкций уменьшение интенсивности магнитного поля достигается путем выбора фазировки напряжения на проводах и кабелях каждой цепи.

#### Список литература

- 1 СанПиН 2.2.4.1191–03. Гл. 3.4: Предельно допустимые уровни электромагнитного поля частотой 50 Гц.
- 2 Санитарные нормы и правила СанПин 2.2.4.723–98: изд. офиц. – М. : Минздрав России, 1999.
- 3 Постановление главного санитарного врача РФ № 74 от 25 сентября 2007 г. О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200–03 «Санитарнозащитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов».

УДК 539.3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОУПРУГОГО МАТЕРИАЛА

*П. С. ШЕСТЕРКИН, Ю. О. СОЛЯЕВ, А. В. БАБАЙЦЕВ*  
*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

В работе рассматривались характеристики демпфирования, обеспечиваемые различными вязкоупругими материалами. Характеристики демпфирования вязкоупругого материала исследовались с использованием метода демпфирования с ограниченным слоем. Использовался вязкоупругий материал в качестве основного слоя, при котором получалось существенное демпфирование с минимальным воздействием на общую массу конструкции. В подобной структуре энергия рассеивается посредством процессов релаксации в длинноцепочечных молекулярных сетях, когда полимерный материал подвергается вибрациям.

Проводилось экспериментальное исследование вязкоупругих материалов путем испытаний на балке Оберста и импульсной техники в соответствии со стандартом ASTM E 756. Величина демпфирования структуры измерялась методом полосы пропускания половинной мощности. Для измерения демпфирующих характеристик использовалась демпфирующая обработка с ограниченным слоем. Демпфирование в ограниченном слое более эффективно, чем демпфирование в свободном слое, поскольку при работе, выполняемой при сдвиге в вязкоупругом слое, расходуется и рассеивается больше энергии на тепло. Такая обработка считается эффективным способом подавления вибраций от различных конструкций, изготовленных из обычных материалов (к примеру сталь), которые содержат небольшое демпфирование. Эффективность демпфирующей обработки ограниченного слоя в большей степени зависит от геометрии и типа ограничивающего слоя. Максимальная величина напряжения сдвига достигается всякий раз, когда ограничивающий слой имеет тот же тип и геометрию, что и демпфирующая структура.

*Работа выполнена при финансовой поддержке государственного проекта Министерства образования и науки РФ код проекта «Современные технологии экспериментального и цифрового моделирования и оптимизации параметров систем космических аппаратов», код проекта FSFF-2020-0017.*

УДК 539.3

### ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ ЛИНЕЙНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКОЙ С УЧЕТОМ НЕПОЛНОГО ОПИРАНИЯ НА УПРУГОЕ ОСНОВАНИЕ

*А. В. ЯРОВАЯ*  
*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В практике строительства, транспортного машиностроения широко используются трехслойные панели, которые могут полностью опираться на упругое основание, а также иметь зазоры между

конструкцией и основанием. Причиной появления зазора между конструкцией и основанием могут быть как техногенные условия в зоне строительства, так и природные условия. Это приводит к изменению расчетной схемы и напряженно-деформированного состояния рассматриваемого элемента, что в ряде случаев может привести к его преждевременному разрушению.

Рассматривается прямоугольная трехслойная пластина длиной  $l$ , шириной  $b_0$  и высотой  $h$  (рисунок 1). На верхний внешний слой пластины действует распределенная нагрузка, изменяющаяся по линейному закону от значения  $q_0$  до  $q_l$ .

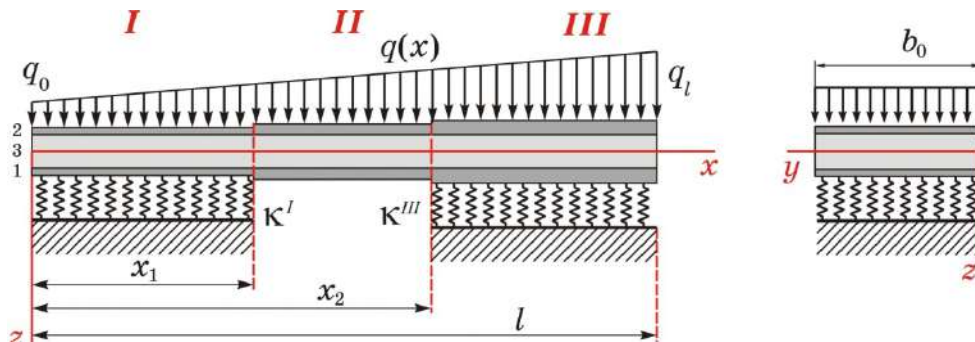


Рисунок 1 – Расчетная схема прямоугольной трехслойной пластины

Номер слоя обозначен индексом  $k$  ( $k = 1, 2, 3$ ). Система координат  $x, y, z$  связана со срединной плоскостью заполнителя. По длине пластины выделяются три участка  $I$  ( $0 \leq x \leq x_1$ ),  $II$  ( $x_1 \leq x \leq x_2$ ),  $III$  ( $x_2 \leq x \leq l$ ). Пластина имеет ступенчато-переменную толщину, высота 1-го и 2-го несущих слоев и половина высоты заполнителя на  $n$ -м участке обозначены  $h_1^n, h_2^n, c^n$  ( $n = I, II, III$ ).

Нагрузка изменяется вдоль пластины по закону:

$$q(x) = q(a_0x + b_0), \quad (1)$$

где  $q, a_0, b_0$  – константы,  $q(0) = qb_0 = q_0$ ;  $q(l) = q(a_0l + b_0) = q_l$ .

Пластина опирается на два участка упругого основания Винклера, через  $\kappa^n$  обозначен коэффициент жесткости упругого основания на  $n$ -м участке. Реакция основания  $q_R^n(x)$  пропорциональна прогибу  $w^n(x)$ :  $q_R^n(x) = \kappa^n w^n(x)$ . Слои считаются несжимаемыми по толщине. Деформации малые. Материалы слоев проявляют упругие свойства, для них справедлив закон Гука.

Для описания кинематики трехслойного пакета используется гипотеза «ломаной» линии: прямолинейная до деформирования нормаль при изгибе становится ломаной; в несущих слоях нормаль остается перпендикулярной к деформированной оси стержня; в заполнителе за счет сдвига она поворачивается на дополнительный угол.

В качестве искомых величин принимаются функции  $w^n(x), u^n(x)$  – прогиб и продольное перемещение срединной плоскости заполнителя, а также  $\psi^n(x)$  – угол поворота нормали в заполнителе за счет сдвига (угол сдвига) на  $n$ -м участке. В точках сопряжения участков соблюдаются условия непрерывности перемещений.

Уравнения равновесия выводятся с помощью принципа возможных перемещений Лагранжа, который выражает условие равновесия системы внутренних и внешних сил. Для этого составляются и приравниваются выражения возможных работ внешних и внутренних сил. Из полученного равенства следуют дифференциальные уравнения равновесия в усилиях, силовые граничные условия и условия для внутренних усилий в точках сопряжения участков.

Связь напряжений  $\sigma_x$  и деформаций  $\epsilon_x$  при цилиндрическом изгибе ортотропной пластины:

$$\sigma_x = A_x \epsilon_x; \quad A_x = \frac{E_x}{1 - \nu_{xy} \nu_{yx}}. \quad (2)$$

где  $E_x$  – модуль Юнга;  $\nu_{xy}, \nu_{yx}, \nu_{xz}$  – коэффициенты Пуассона.

С использованием соотношений (2) компоненты тензора напряжений в слоях выражаются через перемещения, и далее внутренние силы и моменты через искомые функции. Полученные выражения подставляются в уравнения равновесия в усилиях. В результате получаются системы обыкновенных дифференциальных уравнений равновесия упругой трехслойной пластины в перемещениях. Для участков  $I$  и  $III$ , связанных с упругим основанием, система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} a_1^n u^n_{,xx} + a_6^n \psi^n_{,xx} - a_7^n w^n_{,xxx} = 0, \quad a_6^n u^n_{,xx} + a_2^n \psi^n_{,xx} - a_3^n w^n_{,xxx} - a_5^n \psi^n = 0, \\ a_7^n u^n_{,xxx} + a_3^n \psi^n_{,xxx} - a_4^n w^n_{,xxx} - \kappa^n w^n = 0 \quad (n = I, III). \end{aligned} \quad (3)$$

Для участка *II*, не связанного с упругим основанием и нагруженного поперечной нагрузкой, система имеет вид:

$$\begin{aligned} a_1^n u^n_{,xx} + a_6^n \psi^n_{,xx} - a_7^n w^n_{,xxx} = 0, \quad a_6^n u^n_{,xx} + a_2^n \psi^n_{,xx} - a_3^n w^n_{,xxx} - a_5^n \psi^n = 0, \\ a_7^n u^n_{,xxx} + a_3^n \psi^n_{,xxx} - a_4^n w^n_{,xxx} = -q^n, \quad (n = II). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $a_1^n, \dots, a_7^n$  – параметры, характеризующие геометрические и упругие свойства слоев на  $n$ -м участке,

$$a_1^n = A_x^{(1)} h_1^n + A_x^{(2)} h_2^n + 2A_x^{(3)} c^n; \quad a_2^n = c^{n2} \left[ A_x^{(1)} h_1^n + A_x^{(2)} h_2^n + \frac{2}{3} A_x^{(3)} c^n \right]; \dots \quad (5)$$

Соотношения для сдвига в заполнителе  $\psi^n(x)$ , прогиба  $w^n(x)$  и продольного перемещения срединной плоскости заполнителя  $u^n(x)$  получим, решив соответствующие системы уравнений равновесия (3), (4). Аналитический вид решений зависит от типа упругого основания.

Для первого и третьего участков ( $n = I, III$ ) на упругом основании средней жесткости выражение для прогиба имеет вид

$$w^n(x) = C_1^n \operatorname{sh}(\lambda_1^n x) + C_2^n \operatorname{ch}(\lambda_1^n x) + C_3^n \operatorname{sh}(\lambda_3^n x) + C_4^n \operatorname{ch}(\lambda_3^n x) + C_5^n \operatorname{sh}(\lambda_5^n x) + C_6^n \operatorname{ch}(\lambda_5^n x) + w_p^n. \quad (6)$$

Для второго участка ( $n = II$ ), не связанного с упругим основанием,

$$w^n(x) = C_1^n \left( \alpha_{17}^n b_{11}^n x + \alpha_{18}^n x^3 / 6 \right) + C_2^n b_{14}^n \operatorname{ch}(\beta_3^n x) + C_3^n b_{14}^n \operatorname{sh}(\beta_3^n x) + C_4^n x^2 / 2 + C_5^n x + C_6^n + g_2^n(x). \quad (7)$$

В выражениях (6), (7)  $C_1^n, \dots, C_6^n$  – константы интегрирования,  $w_p^n(x) = \frac{q}{\kappa} (a_0 x + b_0)$  – частное решение, соответствующее линейной нагрузке (1), коэффициенты  $b_i^n, \alpha_i^n, \beta_i^n$  и функция  $g_2^n(x)$  выражаются через параметры  $a_i^n$  (5).

Для определения констант интегрирования необходимо учесть граничные условия и условия сопряжения участков друг с другом. Граничные условия на торцах и условия сопряжения на границах участков позволяют составить систему 24-линейных алгебраических уравнений для определения констант интегрирования.

Объединением решений для отдельных участков получаются перемещения для всей пластины. Выражение для прогиба имеет вид

$$w(x) = w^I(x) + \left[ w^{II}(x) - w^I(x) \right] H_0(x - x_1) + \left[ w^{III}(x) - w^{II}(x) \right] H_0(x - x_2). \quad (8)$$

В выражении (8)  $H_0$  – функция Хевисайда.

Был составлен комплекс программ в среде MathCad, с помощью которого получены числовые результаты для нескольких типов трехслойных пакетов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект T20P-047).*

УДК 539.8

## MECHANICAL RESPONSE OF A STRUCTURAL ELEMENT CONTAINING A HEALING AGENT: FINITE ELEMENT MODELING

T. ZHELYAZOV

Technical University of Sofi, Bulgaria

Various types of composites find numerous applications in all fields of industry: aeronautical, automotive, building, etc. Generally, composite materials are a viable technical solution because they are lightweight, and, at the same time, they possess high strength. Also, they are resistant to corrosion, chemical attacks, and high temperature.

This study focuses on the numerical modeling of the structural element made of a cement-based composite containing a healing agent. Presumably, nucleation and propagation of cracks trigger the self-healing

process. The propagating crack could, for example, intersect the encapsulated components of the healing agent, provoking thus their interaction and subsequent hardening of the healing substance. As a result, the structural element might regain partially its initial stiffness and load-carrying capacity.

A damage mechanics-based approach is chosen to simulate the strain-softening behavior of the cement-based composite, specifically, elasticity coupled with damage,

$$\sigma_{ij} = \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E(1-D)\varepsilon_{kk}\delta_{ij} + \frac{\nu}{(1+\nu)} E(1-D)\varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

where  $\sigma_{ij}$  – are the components of the stress tensor,  $\varepsilon_{ij}$  – the components of the strain tensor,  $\nu$  – is the Poisson's ratio,  $E$  – the Yong's modulus, and  $D$  – the damage variable. The damage variable that affects the material properties of the cement-based composite is defined as follows,

$$D = f(C_i, \varepsilon_{eqv}). \quad (2)$$

In equation (2),  $C_i$  are model constants that should be identified based on experimental data, and the equivalent strain is calculated based on the positive principal strains [1]

$$\varepsilon_{eqv} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle \varepsilon_i \rangle}, \quad (3)$$

as the McAuley brackets are classically defined,

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{1}{2}(\varepsilon_i + |\varepsilon_i|). \quad (4)$$

The developed customized numerical procedure integrates the constitutive relationship that models the strain-softening response of the cement-based composite into a general-purpose finite element code. For each increment of the applied load (within the force-controlled or displacement controlled simulation), the stress and the strain distribution within the structural element are obtained by nonlinear finite element analysis. The damage variable is calculated based on the obtained stress and strain distributions. For the subsequent analysis, material properties of the finite elements affected by damage are modified, taking into account the accumulated mechanical damage modeling thus the strain-softening behavior of the cement-based composite (Figure 1).

Finite elements, in which critical damage is detected, are deactivated. In this way, zones of zero rigidity form in the structural element, modeling thus the crack initiation and propagation.

Under the assumption that the self-healing effect is triggered if a specific width of the initiated crack is reached, the healing of the newly-formed cracks is modeled through the homogenization of the system 'cement-based composite – hardened healing agent'.

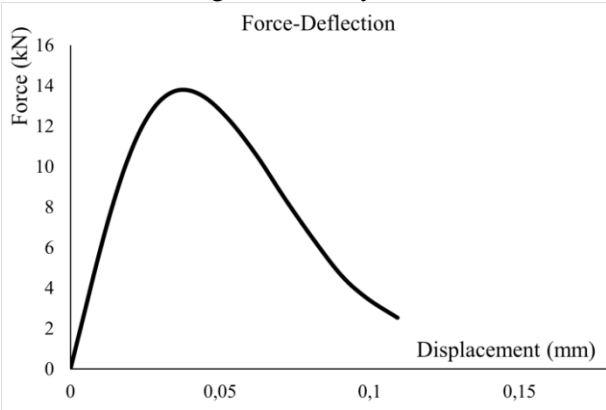


Figure 1 – 'Force – mid-span deflection' relationship obtained by finite element analysis: simulation of a displacement-controlled quasi-static four-point bending test

based composite – hardened healing agent'.

The next steps in this ongoing study are summarized as follows:

- definition of a constitutive relationship capable to account for the potential regain in the stiffness of the cement-based composites resulting from the possible crack reclosures in repetitive loading paths (hysteresis cycles);

- calibration of the strain-softening constitutive relation, based on experimental data obtained in characterization tests, such as compression tests or tension (by flexure) tests performed on small-scale specimens made of cement-based composite;

- validation of the proposed model (integrated into a general-purpose finite element code) through

comparison with benchmark examples (experimental studies) found in the literature;

- definition of dependency (for practical use) between the crack width, the accumulated damage, evaluated through the damage variable, and the effects of various types of healing agents.

#### References

1 Mazars, J. J. Damage mechanics application to nonlinear response and failure behaviour of structural concrete / J. J. Mazars // Ph. D. Thesis. – Paris : Paris 6 University, 1984.

## СОДЕРЖАНИЕ

Приветственное слово ректора университета <i>Ю. И. Кулаженко</i> .....	3
Приветственное слово Начальника Белорусской железной дороги <i>В. М. Морозова</i> .....	4
К 50-летию электротехнического факультета БелИИЖТа-БелГУТа. <i>Ф. Е. Сатырев, В. Г. Шевчук</i> .....	5

### ИНФОРМАЦИОННАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

<i>Белан С. Н., Калэнская Г. Д., Лакатош В. Ф.</i> Защита данных в оперативных системах передачи железнодорожного транспорта .....	6
<i>Бочков К. А., Буй П. М.</i> Кибербезопасность автоматизированных систем управления ответственными технологическими процессами железнодорожного транспорта .....	7
<i>Буй П. М.</i> Актуальные вопросы обеспечения кибербезопасности на железнодорожном транспорте .....	9
<i>Бушуев С. В., Попов А. Н.</i> Возможности повышения пропускной способности железных дорог .....	11
<i>Галушко В. Н., Громыко И. Л.</i> Совершенствование релейной защиты и автоматики тяговых подстанций метрополитена на основе системы мониторинга электрических параметров .....	13
<i>Громыко Т. С., Вербенец Д. В.</i> Оценка безопасности системы 1С: Бухгалтерия для бюджетных учреждений .....	14
<i>Демуськов А. Б.</i> Один из подходов обеспечения информационной безопасности предприятия .....	17
<i>Ефанов Д. В., Абдуллаев Р. Б.</i> Методы синтеза самопроверяемых логических устройств на основе полиномиальных кодов .....	18
<i>Жигалин И. О., Хоменко С. И., Логвиненко И. В.</i> Особенности проведения ФМЕСА микроэлектронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики .....	20
<i>Каменев А. Ю., Лапко А. А., Щерблыккина Е. В., Каменева Н.В.</i> Верификация моделей автоматизированного проектирования и программирования систем железнодорожной автоматики .....	22
<i>Коваленко В. М., Белан С. Н.</i> Информационная безопасность в системах передачи железнодорожного транспорта на основе стеганографии .....	24
<i>Комнатный Д. В.</i> Безопасность аппаратуры систем железнодорожной автоматики и телемеханики при воздействии электромагнитных помех .....	26
<i>Комнатный Д. В.</i> Учет ферромагнитных свойств стали при анализе процессов в рельсовых цепях .....	28
<i>Кузьмин В. С., Меркулов П. М.</i> Совершенствование нормативной документации для контрольных пунктов автоматической локомотивной сигнализации .....	30
<i>Кустов В. Ф.</i> Анализ нормативных показателей функциональной безопасности в стандартах железнодорожной автоматики .....	32
<i>Медведев Д. Д.</i> Автоматизированное рабочее место для расчета и анализа параметров рельсовых цепей ....	34
<i>Рязанцева Н. В., Азимов Г. Р., Стрилец В. Н.</i> Использование сервиса облачного хранилища для мониторинга и управления объектами в режиме реального времени .....	35
<i>Рязанцева Н. В., Жидкова Е. А.</i> Информационно-поисковая система выбора маршрута следования пассажира в региональном сообщении .....	37
<i>Харлап С. Н.</i> Сравнение методов расчета количественных показателей функциональной безопасности в Европейских нормах и ГОСТ .....	39
<i>Харлап С. Н., Занько Р. И.</i> Обзор локомотивных устройств обнаружения препятствий на железнодорожных путях .....	41
<i>Харлап С. Н., Катков В. Л.</i> Программное обеспечение для проведения анализа ФМЕСА микроэлектронных систем железнодорожной автоматики .....	43
<i>Харлап С. Н., Шишковаец В. П.</i> Система автоматического контроля зоны железнодорожного переезда .....	44
<i>Хоменко С. И., Залесовский В. А.</i> Методы обработки результатов измерений и протокол обмена данных измерительного устройства с персональным компьютером .....	46
<i>Хоменко С. И., Медведев Д. Д., Залесовский В. А.</i> Микропроцессорный измеритель параметров четырехполосников .....	48
<i>Шаманов В. И.</i> Вопросы нормирования уровня помех от тягового тока на аппаратуру автоматики .....	50
<i>Шаманов В. И., Денежкин Д. В.</i> Контроль поперечной асимметрии сопротивлений рельсовых нитей .....	52
<i>Шевчук В. Г., Киселева С. В., Зюлева С. Н., Аскерко В. Ю.</i> Анализ причин повреждений кабельных линий связи .....	54
<i>Шевчук В. Г., Кулаженко А. Ю., Титов А. И.</i> Компьютерное моделирование воздействия шума при ограничении его спектра на сигнал НЧ-тракта железнодорожной радиостанции .....	56
<i>Шевчук В. Г., Сугако В. В.</i> Совершенствование технических нормативных правовых актов службы сигнализации и связи Белорусской железной дороги .....	58

**ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ  
В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

<i>Андреев А. И., Кокин С. М., Никитенко В. А.</i> Разработка спектральной методики выявления соответствия состава эталону в органических жидких образцах различного происхождения .....	60
<i>Аскеров С. А.</i> Исследование трещинообразования в тормозном барабане автомобиля при торможении.....	62
<i>Аунг Чжо Тху, Бабайцев А. В., Рабинский Л. Н.</i> Исследование влияния геометрических параметров цилиндрической оболочки эллиптического сечения под давлением, зажатой между абсолютно жесткими пластинами на ширину зоны контакта. ....	64
<i>Бабайцев А. В., Бодрышев В. В., Белов В. А.</i> Исследование процессов деформации материалов с помощью цифровой обработки изображений. ....	64
<i>Бабайцев А. В., Орехов А. А., Рабинский Л. Н.</i> Механические характеристики образцов из $AlSi_{10}Mg$ , полученных методом лазерного спекания порошка .....	65
<i>Бабайцев А. В., Орехов А. А., Рабинский Л. Н.</i> Свойства и структура образцов из $AlSi_{10}Mg$ , полученных методом лазерного спекания порошка.....	66
<i>Бабайцев А. В., Шумская С. А.</i> Исследование влияния объемного содержания заполнителя, полученного по технологии FDM, на прочность при ударном воздействии. ....	66
<i>Бабич С. Ю., Глухов Ю. П., Лазар В. Ф.</i> Построение точных решений динамических задач для тел с начальными напряжениями на основе комплексных потенциалов.....	67
<i>Багно А. М., Шурук Г. И.</i> Влияние слоя вязкой жидкости на поверхностную неустойчивость предварительно деформированного упругого полупространства .....	68
<i>Большаков Р. С., Николаев А. В.</i> Особенности формирования режимов работы транспортных и технологических машин при наличии рычажных связей. ....	70
<i>Ваныкина Г. В., Сундукова Т. О.</i> Анализ интеллектуальных транспортных систем с использованием эмерджентного моделирования.....	72
<i>Велизаде Э. С.</i> Оптимальное проектирование фрикционной пары тормозного механизма с равномерным распределением температуры поверхности трения .....	74
<i>Гетманов А. Г., Мартиросов М. И., Рабинский Л. Н.</i> Наноиндентирование порошковых лакокрасочных покрытий на полиэфирной и эпоксидно-полиэфирной основе на стальных образцах .....	76
<i>Горохова М. В.</i> Исследование влияния уровня дефектности сварных швов на статическую прочность магистральных нефтепроводов .....	77
<i>Гундина М. А., Грузд Н. А.</i> Компьютерная обработка транспортного штрихового кода .....	79
<i>Давыдов А. М.</i> УФ-С излучение: вопросы безопасного применения на транспорте в условиях пандемии COVID-19.....	81
<i>Дмитриев В. Г., Егорова О. В., Попова А. Р.</i> Математическое моделирование особенностей деформирования неоднородных оболочек вращения при больших перемещениях и углах поворота нормали .....	83
<i>Егорова М. С., Тушавина О. В.</i> Математическое моделирование высокоинтенсивного теплового излучения на элементы теплозащитных композиционных материалов космического аппарата.....	83
<i>Елисеев С. В., Ситов И. С., Большаков Р. С., Елисеев А. В.</i> О возможностях коррекции динамических состояний при вибрационных взаимодействиях элементов технических систем.....	84
<i>Зверев Н. А., Земсков А. В.</i> Нестационарная механо диффузия для многокомпонентного цилиндра под действием объемных возмущений с учетом релаксации. ....	86
<i>Зеленая А. С.</i> Перемещения в прямоугольной трехслойной пластине со сжимаемым заполнителем .....	87
<i>Земсков А. В., Тарлаковский Д. В.</i> Моделирование нестационарных упругодиффузионных колебаний прямоугольной ортотропной пластины Кирхгофа – Лява .....	89
<i>Капустин А. Г., Терещенко К. В.</i> Машинное обучение как мощный инструмент синтеза субоптимальных регуляторов систем управления .....	91
<i>Карнаухов В. Г., Козлов В. И., Зинчук Л. П.</i> Численное моделирование параметрических колебаний пьезоэлектрических тел .....	93
<i>Козел А. Г., Окочеников А. С.</i> Физически нелинейная круговая трехслойная пластина, свободно опертая на основании Пастернака .....	95
<i>Кузнецова Ек. Л.</i> Методология численного решения обратных задач теплопереноса в анизотропных композиционных материалах.....	97
<i>Кузнецова Ек. Л., Шемяков А. О.</i> Методология восстановления компонентов тензора теплопроводности анизотропных материалов на основе новых численных методов .....	97
<i>Кулаженко Ю. И.</i> Нахождение центроидов у специально построенных на $n$ -арной группе треугольников... ..	98
<i>Курбатов А. С., Орехов А. А.</i> О применении методов гамильтоновой механики к динамическим задачам тонкостенных конструкций .....	98
<i>Леоненко Д. В.</i> Краевая задача изгиба круговой трехслойной пластины ступенчато-переменной толщины ..	99
<i>Локтева Н. А., Сердюк Д. О., Скопинцев П. Д.</i> Исследование нестационарного деформированного состояния анизотропной цилиндрической оболочки .....	99
<i>Луцкая И. В., Максимюк В. А.</i> О деформировании тороидальной оболочки суперэллиптического поперечного сечения.....	101



<i>Мартыросов М. И., Дедова Д. В., Хомченко А. В.</i> Исследование поведения пластины из полимерного композита с внутренними повреждениями под действием статических и динамических нагрузок .....	103
<i>Медведский А. Л., Мартыросов М. И., Хомченко А. В.</i> Расслоения в элементах конструкций из полимерных композитов и их влияние на прочность при действии динамических нагрузок .....	105
<i>Мейш В. Ф., Мейш Ю. А., Корниенко В. Ф.</i> Сравнительный анализ результатов расчетов динамического поведения трехслойных сферических оболочек согласно различных теорий .....	106
<i>Можаровский В. В., Кузьменков Д. С., Кукареко В. А.</i> Реализация задачи определения температуры и теплового потока в покрытии.....	108
<i>Нестерович А. В.</i> Деформирование трехслойной пластины со свободным контуром осесимметричной нагрузкой в своей плоскости .....	110
<i>Погодин В. А., Рабинский Л. Н., Ситников С. А., Абгарян В. К., Нигматзянов В. В.</i> Модель температурных полей газоразрядной камеры высокочастотного ионного двигателя, изготовленной из кремнийорганических композиционных материалов.....	111
<i>Погодин В. А., Рабинский Л. Н., Ситников С. А., Нигматзянов В. В.</i> Полимерные прекурсоры для создания газоразрядной камеры электрического ракетного двигателя.....	112
<i>Поддубный А. А., Гордон В. А.</i> Деформирование балки при внезапном изменении структуры упругого основания.....	113
<i>Поляков П. О., Горюнов Р. В., Соляев Ю. О.</i> Изготовление и испытание тепловых макетов приемопередающих модулей активной фазированной антенной решетки, выполненных с применением плоских тепловых труб.....	115
<i>Пронина П. Ф., Тушавина О. В.</i> Математическое моделирование теплового воздействия внешних источников тепловых потоков на поверхность космических аппаратов с экранно-вакуумной изоляцией .....	115
<i>Пшеничников С. Г.</i> Нестационарная динамическая задача для линейно-вязкоупругого кусочно-однородного слоя .....	116
<i>Пшеничников Ю. А.</i> Анализ уровня знаний абитуриентов и студентов первого курса .....	118
<i>Рабинский Л. Н., Ресулжыльева Г.</i> Исследование влияния параметров технологических режимов на характеристики, прочности и пластичности для материалов, получаемых с использованием технологии послойного лазерного синтеза.....	120
<i>Сарасеко Е. Г.</i> Охрана окружающей среды в обеспечении безопасности транспортных средств.....	120
<i>Сердюк А. О., Сердюк Д. О., Федотенков Г. В.</i> Исследование нестационарного напряженного состояния неограниченной анизотропной пластины Кирхгофа.....	122
<i>Серпичева Е. В., Шишкин С. В., Федотенков Г. В.</i> Расчет и конструирование фланцевых соединений с плоскими уплотнительными прокладками .....	124
<i>Скачѣк П. Д.</i> Анализ шарнирного опирания балки на четвертьпространство и одну восьмую пространства .....	126
<i>Сметанкина Н. В., Меркулова А. И., Меркулов Д. А., Постный А. В.</i> Расчет прочности многослойного остекления специальной техники при тепловых нагрузках .....	128
<i>Старовойтов Э. И.</i> Деформирование трехслойной круглой пластины погонными нагрузками .....	130
<i>Сторожук Е. А.</i> Аналитическое решение задачи об изгибе податливой на поперечный сдвиг длинной цилиндрической панели овального сечения.....	132
<i>Сундукова Т. О., Ванькина Г. В.</i> Интеллектуальные транспортные системы .....	134
<i>Тушавина О. В.</i> Напряженно-деформированное состояние теплозащитных плиток, лежащих на упругом основании при действии термосиловых нагрузок.....	134
<i>Федотенков Г. В., Вахтерова Я. А.</i> Обратная нестационарная задача по идентификации нагрузки для балки Тимошенко конечной длины .....	134
<i>Федотенков Г. В., Леоненко Д. В., Старовойтов Э. И., Михайлова Е. Ю.</i> Нестационарная динамика тонкостенных элементов конструкций с учетом их связи с деформируемыми основаниями.....	136
<i>Харитонов Ю. Н.</i> К вопросу снижения интенсивности магнитных полей кабельных линий высокого напряжения .....	137
<i>Шестеркин П. С., Соляев Ю. О., Бабайцев А. В.</i> Экспериментальное исследование демпфирующих характеристик вязкоупругого материала .....	139
<i>Яровая А. В.</i> Цилиндрический изгиб прямоугольной трехслойной пластины линейно распределенной нагрузкой с учетом неполного опирания на упругое основание.....	139
<i>Zhelyazov T.</i> Mechanical response of a structural element containing a healing agent: finite element modeling.....	141

Научно-практическое издание

**ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ**

Материалы X Международной научно-практической конференции  
(Гомель, 26–27 ноября 2020 г.)

Часть 1

Издается в авторской редакции

Технический редактор *В. Н. Кучерова*  
Корректор *Т. А. Пугач*  
Компьютерная верстка – *С. В. Ужанкова*

Подписано в печать 16.11.2020 г. Формат 60×84 1/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 17,20. Уч.-изд. л. 15,75. Тираж 25 экз.  
Зак. №. 3166. Изд. № 67.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/361 от 13.06.2014.  
№ 2/104 от 01.04.2014.  
№ 3/1583 от 14.11.2017.  
Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель

ISBN 978-985-554-942-1



9 789855 154942 1