



ГУАП

Государственный университет
аэрокосмического приборостроения



АЭРОКОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ



**Вторая Международная
научная конференция
14–22 апреля 2021 г.**

Санкт-Петербург

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

*Посвящается 80-летию
Санкт-Петербургского государственного университета
аэрокосмического приборостроения*

АЭРОКОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Вторая Международная научная конференция
14–22 апреля 2021 г.

Сборник докладов

УДК 001.8
ББК 34.9
А99

А99 Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Вторая Международ. науч. конф. (СПб., 14–22 апреля 2021 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2021. – 353 с.
ISBN 978-5-8088-1554-4
DOI: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2

В апреле 2021 г. в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения состоится Вторая Международная конференция «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии», посвященная Всемирному дню авиации и космонавтики.

В работе секций приняли участие ведущие ученые и специалисты предприятий, преподаватели, научные сотрудники и аспиранты вузов как международного уровня, так и из различных регионов России.

Данный сборник отражает основные направления научных исследований, обсуждаемые на конференции. Представленные работы посвящены проблемам современного аэрокосмического приборостроения, аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, интеллектуальных транспортных систем и управления цепями поставок, вопросам эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, систем навигации, стабилизации, а также проблемам разработки и внедрения аэрокосмических компьютерных и программных систем, систем передачи данных и программных комплексов, математическому и программному обеспечению.

Сборник предназначен для научных работников, аспирантов, докторантов и студентов старших курсов технических университетов, руководителей компаний и международных специалистов.

УДК 001.8
ББК 34.9

Оргкомитет конференции

Председатель оргкомитета:

Антохина Ю. А., д-р экон. наук, профессор, ректор ГУАП

Члены оргкомитета:

Майоров Н. Н., канд. техн. наук, доцент

Небылов А. В., д-р техн. наук, профессор

Никитин В. Г., канд. техн. наук, доцент

Овчинникова Н. А., канд. техн. наук, доцент

Скорина С. Ф., канд. техн. наук, доцент

Фетисов В. А., д-р техн. наук, профессор

Шейнин Ю. Е., д-р техн. наук, профессор

Шехунова Н. А., д-р техн. наук, профессор

Шишлаков В. Ф., д-р техн. наук, профессор

ISBN 978-5-8088-1554-4
DOI: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2

© Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения, 2021

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

Уважаемые участники Второй Международной конференции «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии» в ГУАП!

Данная Международная конференция в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения является крайне важным событием в календаре специалистов авиационно-космической отрасли как Санкт-Петербурга, так и других городов мира. В этом году Международная конференция приурочена ко Всемирному дню авиации и космонавтики и к юбилею нашего университета. В этом году ГУАП отмечает 80-летний юбилей. 25 января 1941 г. вышло Постановление о создании в Ленинграде авиационного института (ЛИАИ). В составе вуза было три факультета – Самолетостроительный, Приборостроительный и Мотостроительный.

Все эти годы, с момента своего основания, Университет решает актуальные и востребованные задачи как в области образования, так и для приборостроительной, космической, транспортной, информационной отраслей России. Сегодня ГУАП является лидером в области подготовки и исследований по компетенциям будущего (FutureSkills), проводит актуальные исследования, результаты которых представлены в материалах конференции.

Международная конференция представляет собой четыре секции, каждая из которых посвящена актуальным исследованиям, проводимым как на предприятиях, так и в Институте аэрокосмических приборов и систем ГУАП в области аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, в области интеллектуальных транспортных систем, системного анализа и логистики, эксплуатации и управления аэрокос-



мическими системами, в области аэрокосмических компьютерных и программных систем. Конференция проводится второй раз, и приятно видеть, что число авторов и заинтересованных университетов, представляющих результаты исследований, увеличивается.

Выражаю уверенность в том, что данная конференция станет важной вехой в проведении диалога между специалистами, знакомства с передовым опытом, а также будет способствовать взаимодействию исследователей с целью получения информации о новых научно-технических решениях в области аэрокосмического приборостроения и эксплуатационных технологий.

Желаю Вам успешной работы и конструктивного обмена мнениями и идеями!

Ректор ГУАП, профессор

Ю. А. Антохина

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.396.962.25

М. С. Барилко*

главный специалист

А. А. Тарасенков**

старший преподаватель

* АО «Производственное объединение „Уральский оптико-механический завод им. Э. С. Яламова“», филиал «Урал-ГОИ», Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РАДИОВОЛНОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ОХРАННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены основные конструктивные особенности радиоволнового датчика для систем периметровой сигнализации. Предложены технические решения, обеспечивающие высокую надежность и технологичность изделия. Представлены расчетные и экспериментальные результаты основных параметров устройства.

Ключевые слова: охранные системы, радиоволновый датчик, patch-антенна.

M. S. Barilko*

Chief Specialist

A. A. Tarasenkov**

Senior Lecturer

* JSC «Production Association „Ural Optical and Mechanical plant named after E. S. Yalamov“», Saint-Petersburg

** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RADIO-FREQUENCY SENSOR FOR SECURITY SYSTEMS

The article describes main construction features of radio-frequency sensor for perimeter security systems. Technical solutions suggested in the article provide high reliability and manufacturability of the sensor. The article contains theoretical and experimental data obtained in the course of development.

Keywords: radio-frequency sensor, security systems, patch-antenna.

Современные высоконадежные системы периметровой сигнализации представляют собой сложный комплекс обработки информации от большого числа извещателей использующих в работе разные физические принципы. Это позволяет обеспечивать высокую вероятность обнаружения факта нарушения охраняемого периметра и высокую помехозащищенность.

Радиоволновые позиционные извещатели сегодня получают развитие в качестве основы для таких систем. Принцип их действия основан на радиолокационном обнаружении нарушителя. В качестве примера можно назвать извещатель отечественной разработки, Зебра-60(24), производства ООО «Охранная техника», г. Заречный (рис. 1).

Основой извещателей подобного типа является радиолокационный датчик, сигналы которого



Рис. 1. Радиоволновый извещатель Зебра-60(24)

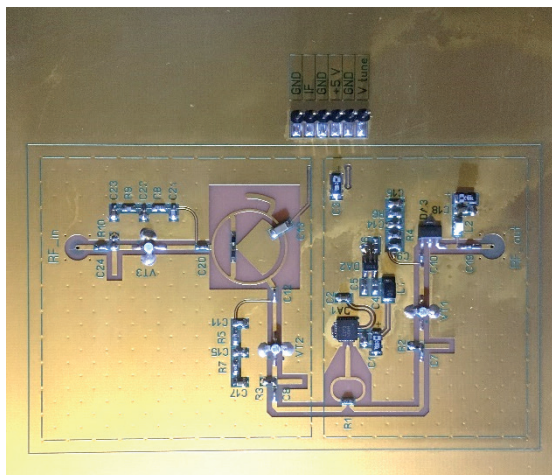


Рис. 2. Внешний вид модуля МПП-5.8

го воспринимает цифровое устройство обработки. **Целью** настоящей статьи является рассмотрение некоторых особенностей построения такого датчика.

Сегодня на рынке можно найти большое количество радиоволновых сенсоров зарубежного и отечественного производства. Чаще всего эти устройства работают в диапазоне 24 ГГц. Столь малое значение длины волны делает их чувствительными к погодным условиям, колебаниям травы, появлению в охраняемом секторе мелких животных. В связи с этим стала актуальной задача перехода на большую длину волны, что вызывает чувствительность лишь появлению относительно крупных объектов. Примером такого устройства является радиоволновый датчик, разработанный авторами данной статьи. Внешний вид показан на рис. 2.

В качестве диапазона рабочих частот был выбран стандартный Wi-Fi 5.6 ГГц, что с одной стороны не требует специальных разрешений

для использования от ГКРЧ, с другой – обеспечивает достаточно большую длину волны.

1. Структурная схема устройства показана на рис. 3. Радиоволновый датчик состоит из двух основных частей: приемопередатчик [1] и РАТСН-антенная решетка [2]. Несущую частоту задает генератор управляемый напряжением (ГУН) [3]. В зависимости от уровня на входе «модуляция» несущая может перестраиваться в пределах 5,5–6,1 ГГц. Половина мощности ГУН отбирается для формирования гетеродинного сигнала смесителю [4], другая половина усиливается и поступает на передающую антенну. Расщепление мощности производится кольцевым мостом Вилкинсона, что обеспечивает хорошую линейность в заданном диапазоне частот. Сигнал с приемной антенны поступает непосредственно на смеситель [1], где в комбинации с гетеродинным сигналом выделяется частота биений.

Спектр низкочастотного сигнала биений зависит от радио обстановки в секторе диаграммы направленности антенны. Другими словами, появление в этом секторе какого-либо объекта вызывает изменения в спектре сигнала биений и может быть детектировано устройством обработки.

Специфика приемопередающих устройств в охранных системах требует обеспечения высокой надежности работы в широком диапазоне температуры и влажности, высокой технологичности конструкции, и минимального количества настроек. Для выполнения этих требований было предложено исполнение, в виде модуля, представляющего собой многослойную печатную плату (ПП), где, с одной стороны, размещена антенная решетка, с другой – элементы приемопередатчика, защищенные экранирующим кожухом.

Серьезную проблему вызвало проектирование межслойных волновых антенных переходов

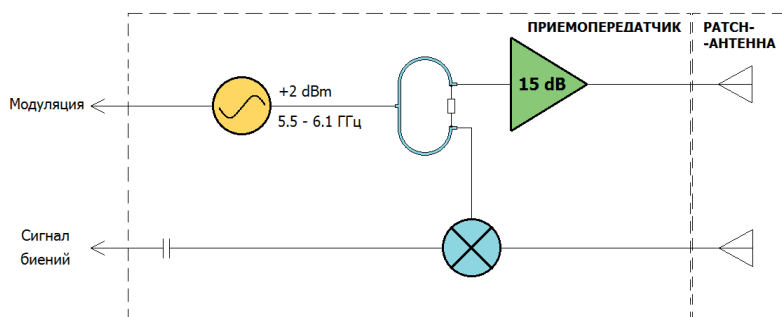


Рис. 3. Структурная схема датчика МПП-5.8

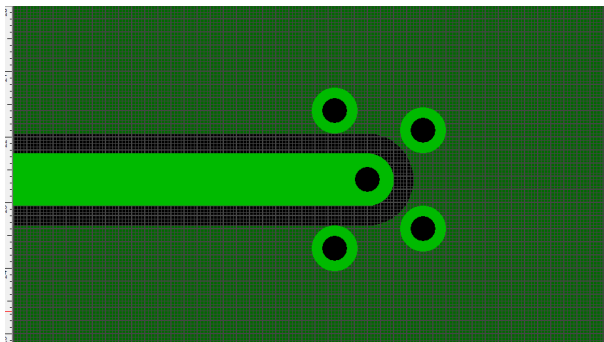


Рис. 4. Топология межслойного волнового перехода

дов, так как не существует стандартных методик расчета таких волновых устройств [5], [6]. Переход был смоделирован в пакете Microwave Office методом конечных элементов, а затем изготовлен в виде макета, с несколькими тестовыми вариантами топологии. На рис. 4 показана одна из тестовых реализаций топологии.

При помощи векторного анализатора цепей были получены диаграммы полных сопротивлений и S-параметров для каждой топологии, что позволило выбрать оптимальный для данной ПП вариант. Результаты измерений на макетном образце приведены на рис. 5.

Проектирование антенной решетки с заданными характеристиками направленности и коэф-

фициента усиления явилось одной из важнейших конструкторских задач в данной разработке. Топология антенны была создана при помощи симулятора OpenEMS. Моделирование параметров выполнено методом конечных элементов, что позволило получить хорошую сходимость с ее физической реализацией. Благодаря этому была создана направленная микрополосковая с требуемыми характеристиками без элементов настройки.

На рис. 6 показана диаграмма КСВ в полосе рабочих частот полученная в результате моделирования и полученная на векторном анализаторе у реального образца.

Сектор зоны чувствительности датчика определяется формой диаграммы направленности антенны и имеет строгие ограничения, связанные с перекрытием сигналов от соседних извещателей в охраняемом периметре. Получить заданную направленность позволяет антенна, состоящая из восьми излучающих элементов. Соответствующие диаграммы показаны на рис. 7.

Радиоволновый датчик, рассмотренный в настоящей статье, на данный момент находится на стадии отработки технологического процесса. Достигнутые технические характеристики позволяют ему найти применение в охранных системах на уровне с отечественными и зарубежными аналогами, а использование диапазона 5,6 ГГц дает ему дополнительное преимущество в помехозащищенности.

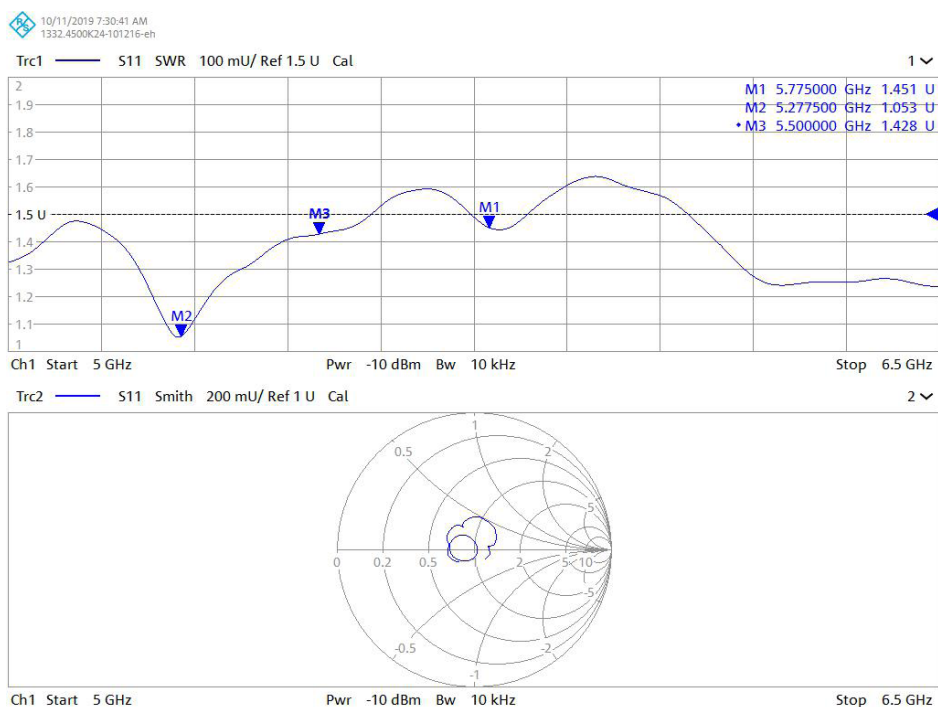


Рис. 5. Диаграммы S-параметров и полных сопротивлений межслойного волнового перехода

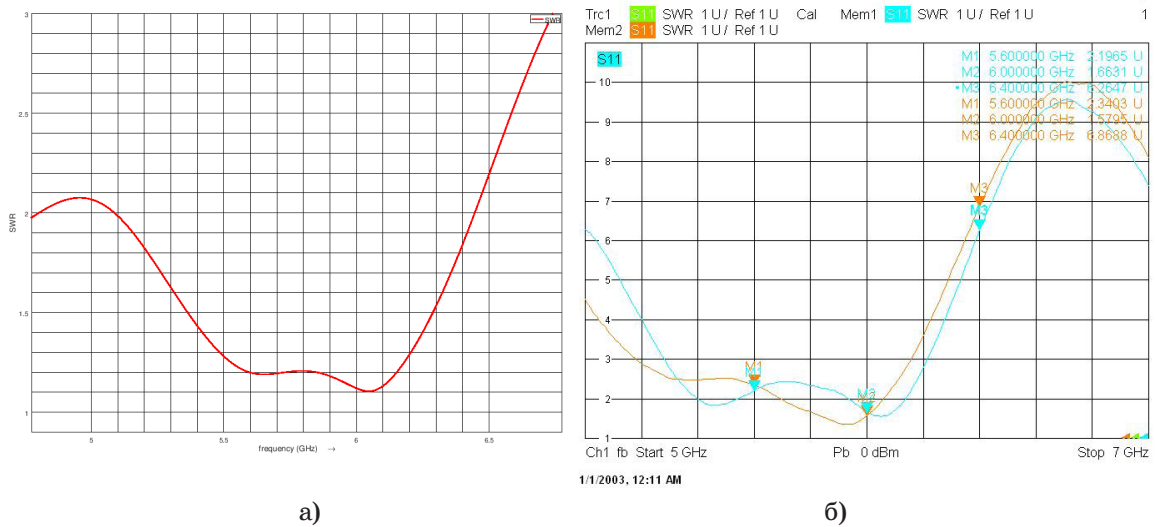


Рис. 6. КСВ антенной решетки, полученное: а – на модели; б – на векторном анализаторе цепей

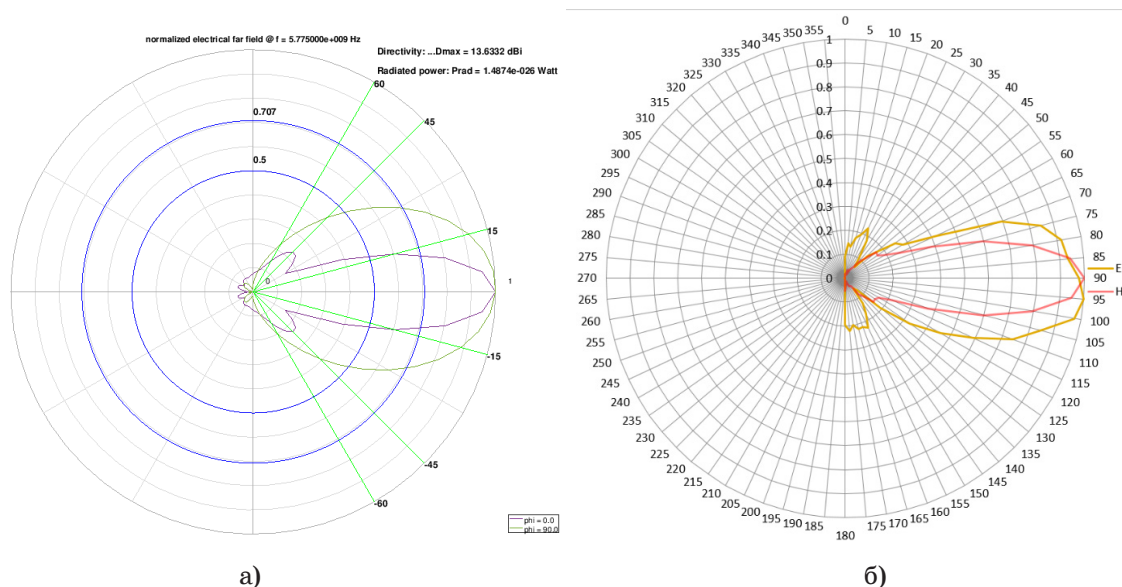


Рис. 7. Диаграмма направленности антенной решетки, полученная: а – на модели; б – при натурных измерениях

Библиографический список

1. Сиверс А. П. Проектирование радиоприемных устройств. М.: Сов. радио, 1976.
2. Стешковой А. С., Туровский А. В. Малогабаритная ПАТЧ-антенна СВЧ-диапазона // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 1. С. 1–7.
3. Grebennikov A. RF and Microwave Transistor Oscillator Design. Infineon Technologies AG. John Wiley & Sons Ltd, 2007.

4. IEEE Broadband Millimeter-Wave Single Balanced Mixer and Its Applications to Substrate Integrated Wireless Systems / Zhen-Yu Zhang, Ying Rao Wei, and Ke Wu, Fellow // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2012. Vol. 60, № 3.
5. Маттей Д. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи / пер. с англ.; под ред. Л. В. Алексеева, Ф. В. Кушнера. М.: Связь, 1971.
6. Chris Bowick. RF circuit design. Indianapolis. Elsevier, 1982.

УДК 681.518

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-9-12

А. А. Беляев*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Основной целью работы являлось изучение основных вопросов, касающихся интеллектуализации в задачах управления беспилотными летательными аппаратами. В частности, были изучены актуальные вопросы интеграции технологий искусственного интеллекта в решении задач управления. Автором производится работа посредством применения статистических данных и информации, а также эмпирических и теоретических методов исследования. С целью более полного раскрытия темы и получения достоверных данных используются публикации и материалы отечественных и зарубежных источников.

Ключевые слова: искусственный интеллект, интеллектуализация, беспилотный летательный аппарат, управление, интеграция.

А. А. Belyaev*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ON THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE MANAGEMENT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

The main purpose of this work was to study the main issues related to intellectualization in the management of unmanned aerial vehicles. In particular, topical issues of integration of artificial intelligence technologies in solving management problems were studied. The author works through the use of statistical data and information, as well as empirical and theoretical research methods. For the purpose of more complete disclosure of the topic and obtaining reliable data, the author uses publications and materials from domestic and foreign sources.

Keywords: artificial intelligence, intellectualization, unmanned aerial vehicle, management, integration.

Задачи управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) приобретают колоссальную актуальность на сегодняшний день. Данный фактор является следствием того, что БПЛА актуализируются в применении практически во всех сферах жизнедеятельности современного человека. Таким образом, беспилотные летательные аппараты выполняют как бытовые, так и профессиональные задачи в современном мире, одними из примеров которых являются доставка продовольствия и медикаментов в качестве гуманитарной помощи в отдаленных или отрезанных природными катаклизмами регионах; выполнение боевых задач по разведке или уничтожению целей и др. [1].

Необходимо отметить, что разработка беспилотных летательных аппаратов является сферой, затрагивающей наиболее перспективные и развивающиеся дисциплины, находящиеся на стыке математических, инженерных и компьютерных наук. Благодаря открытым протоколам и программным интерфейсам стандарт-

ное программное обеспечение БПЛА имеет возможность к интеграции дополнительных модулей, современные исследователи активно используют данную возможность. Таким образом, программируются и реализуются различные методы управления и навигации с целью их интеграции в единый комплекс управления беспилотным летательным аппаратом.

Именно интеллектуальные системы управления БПЛА представляют наибольший интерес и актуальность на сегодняшний день. Необходимо отметить, что автономные системы управления, функционирующие без участия человека, являются основным компонентом, обеспечивающим безопасное и эффективное применение БПЛА в различных целях. Одно из основных направлений — это интеллектуализация робототехнических систем, а также предоставление возможности к их самодиагностике для принятия решений являющихся оптимальными в условиях поставленной задачи. Именно применение технологий искусственного интел-

лекта способно решить многие задачи управления беспилотным летательным аппаратом, существующие на сегодняшний день.

Прежде, чем переходить к непосредственному изучению интеграции интеллектуальных систем на базу современных БПЛА, необходимо определить актуальность, а также основные понятия и сведения, относящиеся к технологиям искусственного интеллекта в целом. Актуальность использования искусственного интеллекта (ИИ) является как никогда высокой в современном мире. Именно посредством данных технологий на сегодняшний день решаются одни из самых крупных и сложно-вычислимых задач. Искусственный интеллект находит применение не только при решении математических и иных инженерных задач для принятия оптимальных решений, ведь данная технология успешно применяется в различных бытовых и иных профессиональных сферах жизнедеятельности современного человека [2].

Искусственный интеллект – это прорывная технология, которая включает в себе колоссальный потенциал. Повсеместное внедрение ИИ значительно повышает эффективность компаний, а также их конкурентоспособность с параллельным развитием отраслевых рынков посредством стимулирования создания новых технологий. Ключевой технологией, на базе которой основывается искусственный интеллект, является возможность к «самообучению», а также использованию накопленных данных с целью прогнозирования будущего. Основной отличительной особенностью является то, что при выполнении задач искусственный интеллект не основывается на логических схемах, заданных ранее программистами, а самостоятельно производит настройку комплексных механизмов для принятия решений, основываясь на тех данных и задачах, которые были изначально поставлены программистами.

Продолжая разговор о непосредственной интеллектуализации систем управления БПЛА, необходимо отметить, что для обеспечения эффективного функционирования беспилотных летательных аппаратов напрямую необходима интеграция систем способных самостоятельно решать задачи управления. Данная система подразумевает наличие в себе режимов, посредством которых вырабатывается решение поставленной задачи с помощью логической обработки сигналов. Для того, чтобы режим управления беспилотным летательным аппаратом считался автономным, необходимо использовать аналогичные системы интеллектуального управления.

На сегодняшний день не решенной остается проблема, выраженная в невозможности создания и синтеза интеллектуальных систем управления, рационально выполняющих свои функции в случае частичной потери работоспособности, наиболее актуальной данная проблема является для военного сегмента использования беспилотных летательных аппаратов. В большинстве случаев на сегодняшний день БПЛА управляются оператором вручную посредством дистанционных систем управления [3].

Одним из решений указанных проблем является интеграция комплексно-взаимодействующих методов, указанных на рис. 1.

Таким образом, интеграция комплексно-взаимодействующих методов, показанных на рис. 1, в систему управления беспилотным летательным аппаратом позволяет получить возможность к синтезу перспективных и инновационных интегрированных систем управления.

Изучим одну из технологий разработки интеллектуального алгоритма для управления БПЛА в задачах военного назначения. Для того, чтобы реализовать систему интеллектуального управления, рассмотрим алгоритм модели управления беспилотным летательным аппаратом, в основе которого лежит оптимизация функции полезности. Данная функция производит оценку состояния объекта управления по нескольким параметрам: расположение объекта в пространстве относительно противника, расположение объекта в пространстве относительно союзников, расположение объекта в пространстве относительно препятствий. Также нужно учитывать, что маневрирование на низ-



Рис. 1. Методы, комплексно интегрирующиеся в интеллектуальную систему управления БПЛА

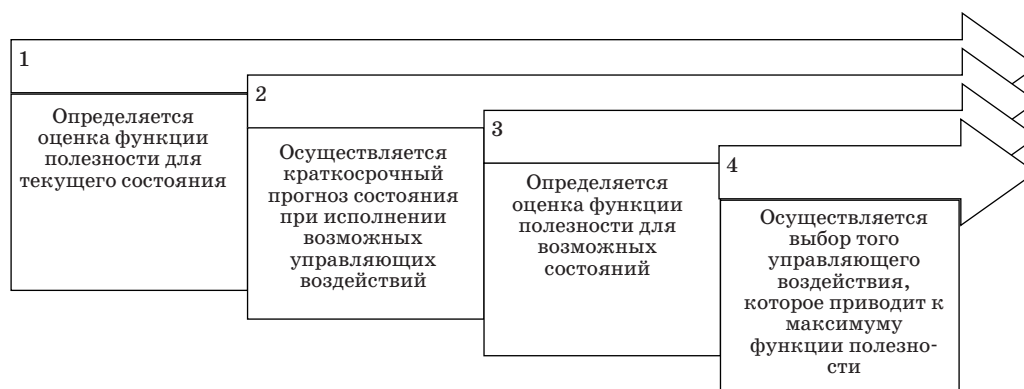


Рис. 2. Алгоритм интеллектуального управления БПЛА

кой скорости менее эффективно, чем на высокой скорости.

Таким образом, управление реализуется при помощи алгоритма, представленного на рис. 2.

Будем считать, что функция полезности является аддитивной и записывается следующим образом:

$$Q = a_1 \cdot q_1 + a_2 \cdot q_2 + a_3 \cdot w + a_4 \cdot s, \quad (1)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – весовые коэффициенты q_1, q_2 ; w, s – функции полезности для оценки параметров взаимного расположения относительно противников, относительно союзных единиц, относительно окружающих объект препятствий, а также для учета скорости объекта управления соответственно.

Для того, чтобы упростить функцию полезности описывающую взаимное положение объекта управления и союзных единиц, будет доста-

точно использовать расположение одной из союзных единиц, находящейся ближе всего к объекту управления. Аналогичным образом можно поступить и с функцией, описывающей взаимное расположение с противником, учитывая только одного из противников, который выбирается встроенной распределительной системой.

Для описания пространственного расположения БПЛА используется функция, использующая значения следующих параметров: L – расстояние между центрами масс объектов; α – между векторами, описывающими скорость двух взаимно расположенных объектов; β – угол между L и вектором скорости первого ЛА. Функция полезности взаимного расположения объекта и препятствий использует параметр l , который описывает минимальное расстояние между ними.

С целью оптимизации поведения БПЛА в условиях маневрирования в ограниченном

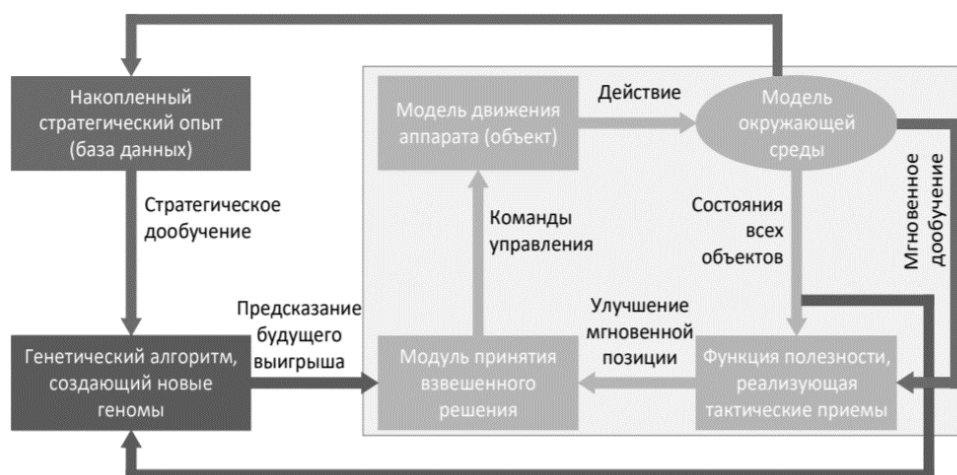


Рис. 3. Стратегия обучения интеллектуального алгоритма

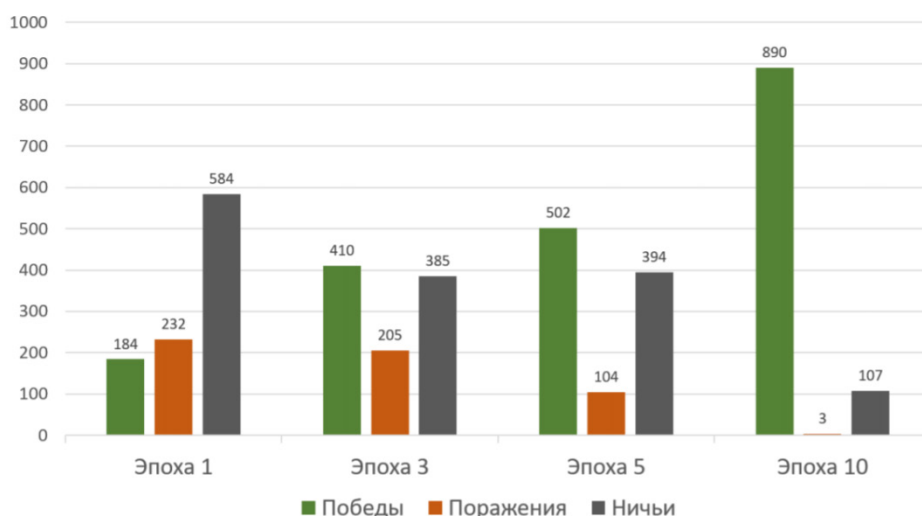


Рис. 4. Статистика за 1000 симуляций боев «один на один»

пространстве и постоянном взаимодействии с союзными единицами для уничтожения сил противника весовые коэффициенты подбираются эмпирически таким образом, чтобы минимизировать свои потери и при этом максимизировать потери противника.

Стратегия обучения интеллектуального алгоритма представлена на рис. 3.

Рассмотрим эффективность изучаемого метода. На рис. 4 приведена статистика за 1000 симуляций боев «один на один» на разных этапах работы генетического алгоритма оптимизации.

Таким образом, видно, что в последнее время прослеживается колоссальный интерес со стороны исследовательского сообщества к созданию интеллектуальных систем управления беспилотным летательным аппаратом нового поколения. Разработка подобных систем управления напрямую подразумевает необходимое использование методов и подходов к решению множества вопросов посредством использования интеллектуальных систем и технологий. В заключение необходимо отметить, что технологии искусственного интеллекта являются частью науки создания интеллектуальных машин, подавляющее большинство которых является интеллектуальными компьютерными программами. Технологии ИИ в широком смысле подразумевают программное обеспечение, имеющее возможность к выполнению задач посредством использования когнитивных способностей чело-

века, к примеру, распознавание речи, интерпретация визуальных образов, анализ логических операций, создание моделей будущего на основе накопленных данных и другое.

Библиографический список

1. Иванов Д. Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Техн. науки. 2011. № 3.
2. Прокопьев И. В. Модель интеллектуального контроллера подстройки эталонной модели для системы координатно-параметрического управления // Труды ИСА РАН. Динамика неоднородных систем. 2010. Т. 53, № 5.
3. Яковлев К. С., Петров А. В., Хитыков В. В. Программный комплекс навигации и управления беспилотными транспортными средствами // Информационные технологии и вычислительные системы. 2013. № 3. С. 72–83.
4. Biard R. U., McLain T. U. Small unmanned aerial vehicles: theory and practice. Moscow: Technosphere, 2015. P. 13–17.
5. Method of classification of stationary and quasi-stationary objects based on dynamic infrared images obtained by complexes with unmanned aerial vehicles / I. N. Ishchuk, A. M. Filimonov, E. A. Stepanov, K. V. Postnov // Radio Engineering. 2016. № 10. P. 145–153.

УДК 629.7.015

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-13-16

Б. Л. Бирюков*

старший преподаватель

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИНЕАРИЗАЦИИ УРАВНЕНИЙ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Рассматривается задача определения параметров траектории полета легкого летательного аппарата самолетного типа в условиях, когда не применима линеаризация уравнений продольного движения. Решение основывается на использовании нелинейностей в исходных уравнениях при численном моделировании движения.

Ключевые слова: летательные аппараты, моделирование движения летательного аппарата, линеаризация уравнений движения, продольное движение летательного аппарата, численное решение уравнений.

B. L. Biryukov*

Senior Lecturer

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SIMULATION OF MOTION OF AIR VEHICLE WITHOUT LINEARIZATION OF EQUATIONS OF LONGITUDINAL MOTION

The problem of determining of flight trajectory parameters of light airplane-type air vehicle is considered in the case when linearization of equations of longitudinal motion is not applicable. The decision is based on the use of nonlinearities in the original equations during numerical computing simulation of the motion.

Keywords: air vehicles, simulation of air vehicle motion, linearization of equations of motion, longitudinal motion of air vehicle, numerical decision of equations.

При решении различных задач, связанных с управлением и оценением вектора состояния летательных аппаратов (ЛА), необходимо анализировать траекторию и другие параметры их движения [1, 2]. Эффективным инструментом при этом является моделирование динамики ЛА на основе численного решения уравнений движения. Главным условием для применимости метода математического моделирования является соответствие получаемых решений результатам натурных экспериментов с реальными объектами.

Движение ЛА может быть описано двумя системами дифференциальных уравнений: уравнениями движения центра масс ЛА (поступательное движение) и уравнениями движения относительно центра масс (вращательное движение). Существуют различные формы записи таких уравнений [3, 4]. В данной работе использованы уравнения в связанной системе координат:

$$\begin{aligned} m \left(\frac{dV_x}{dt} + \omega_y V_z - \omega_z V_y \right) &= F_x, \\ m \left(\frac{dV_y}{dt} + \omega_z V_x - \omega_x V_z \right) &= F_y, \\ m \left(\frac{dV_z}{dt} + \omega_x V_y - \omega_y V_x \right) &= F_z, \\ J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z &= M_x, \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z) \omega_z \omega_x &= M_y, \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y &= M_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_x, V_y, V_z – проекции поступательной скорости движения центра масс; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости вращения относительно центра масс; F_x, F_y, F_z – проекции приложенного к центру масс суммарного вектора сил F , действующих на ЛА; M_x, M_y, M_z – про-

екции момента M этого вектора сил; m – масса ЛА; J_x, J_y, J_z – осевые моменты инерции ЛА. При записи уравнений учтено, что ЛА относится к самолетному типу нормальной схемы (имеет, в частности, продольную плоскость симметрии), и делается допущение, что кинетические моменты вращающихся тел на борту ЛА пренебрежимо малы.

Конкретизируем систему уравнений (1) применительно к продольному движению. Проекция вектора сил F могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} F_x &= -c_x S q + P_x - G \sin \nu, \\ F_y &= c_y S q + P_y - G \cos \nu, \end{aligned} \quad (2)$$

где c_x, c_y – коэффициенты продольной и нормальной аэродинамических сил; q – скоростной напор; S – площадь крыла; G – сила тяжести; ν – угол тангажа; P_x, P_y – проекции силы тяги P на связанные оси, определяемые как

$$P_x = P \cos \varphi_p, P_y = P \sin \varphi_p,$$

где φ_p – угол между вектором тяги и продольной осью. Далее принимается $\varphi_p \approx 0$, поэтому $P_x = P, P_y = 0$.

Момент относительно поперечной оси M_z (момент тангажа) можно представить в виде

$$M_z = m_z q S b_{CAH}, \quad (3)$$

где m_z – коэффициент момента тангажа; b_{CAH} – длина средней аэродинамической хорды крыла.

Для определения линейных координат траектории движения ЛА можно использовать кинематические соотношения

$$\begin{aligned} X &= V_x \cos \nu - V_y \sin \nu, \\ Y &= V_x \sin \nu + V_y \cos \nu, \end{aligned}$$

где X, Y – координаты ЛА в вертикальной плоскости земной системы координат. Угол наклона траектории θ , по определению, равен $\theta = \nu - \alpha$, где угол атаки α связан с проекциями вектора скорости:

$$\alpha = -\arctg \frac{V_y}{V_x}.$$

Уравнения продольного движения в представленном виде являются нелинейными, как за счет наличия тригонометрических функций в правых частях уравнений, так и из-за нелинейной зависимости продольной и нормальной сил и момента тангажа от аэродинамических параметров ((2), (3)). Если ограничиться рассмотрением режимов полета с низкими дозвуковыми скоростями и незначительными изменениями высоты, характерными для легких ЛА (от-

сутствие сжимаемости воздуха и малые изменения плотности воздуха), то нелинейность по аэродинамическим параметрам будет проявляться при приближении к критическим значениям угла атаки и больших относительных изменениях скорости.

На рис. 1–3 представлены результаты моделирования свободного продольного движе-

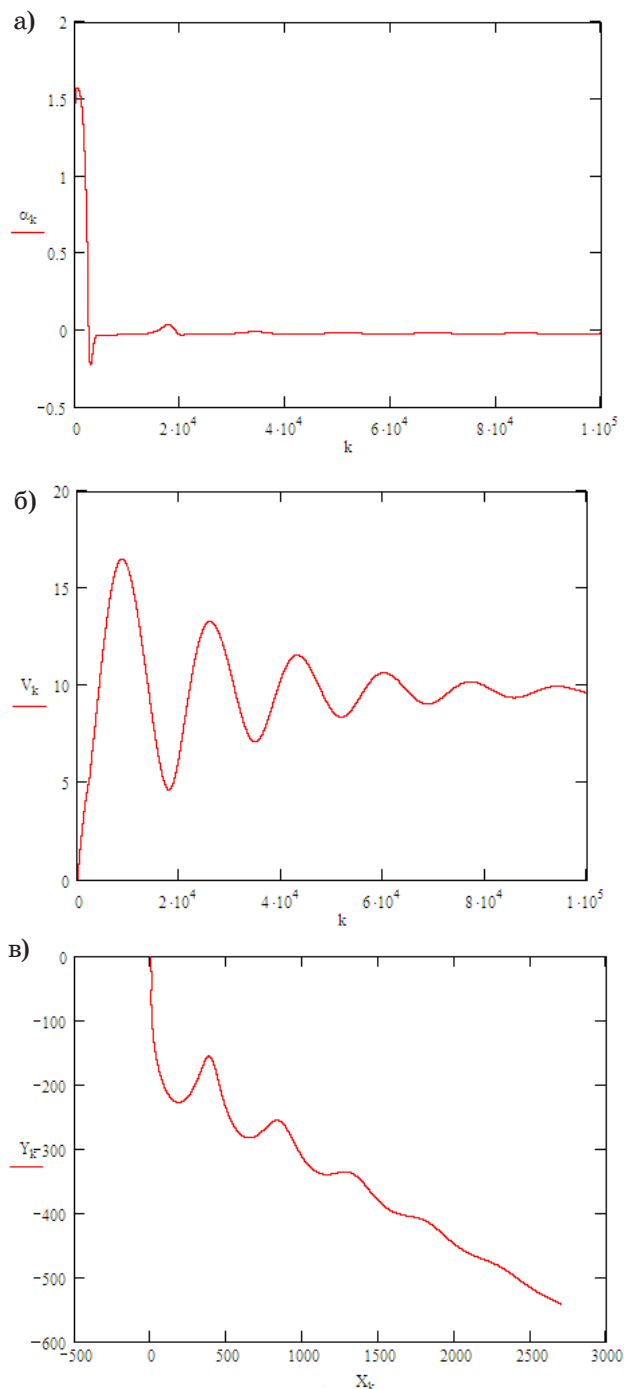


Рис. 1. Параметры движения ЛА с вариантом 1 начальных условий

ния легкого ЛА самолетного типа (а – угол атаки α , рад; б – скорость V , м/с $\times 5^{-1}$; в – координаты траектории X , Y , м $\cdot 2,5^{-1}$) в режимах, когда существенно проявляется нелинейность соответствующих уравнений. Рис. 1 соответствует запуску ЛА с задресселированным двигателем ($P \approx 0$) с нулевыми начальной скоростью и углом тангажа. Видно, что из режима парашю-

тирования ЛА переходит в пикирование и после разгона выходит из пикирования, переходит в набор высоты и кабрирование, затем опять в пикирование, и весь процесс периодически повторяется с потерей высоты и уменьшением амплитуды колебаний. Рис. 2 соответствует запуску ЛА в горизонтальном направлении с большой начальной скоростью. Видно, что ЛА сразу

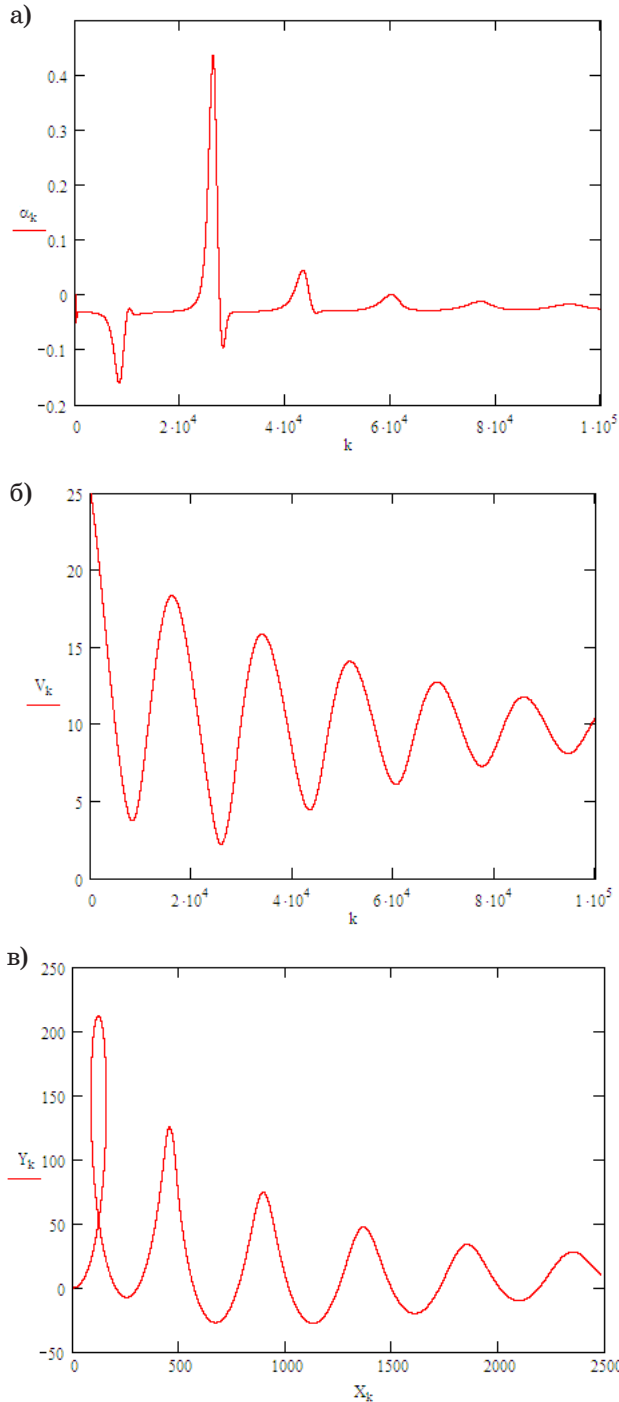


Рис. 2. Параметры движения ЛА с вариантом 2 начальных условий

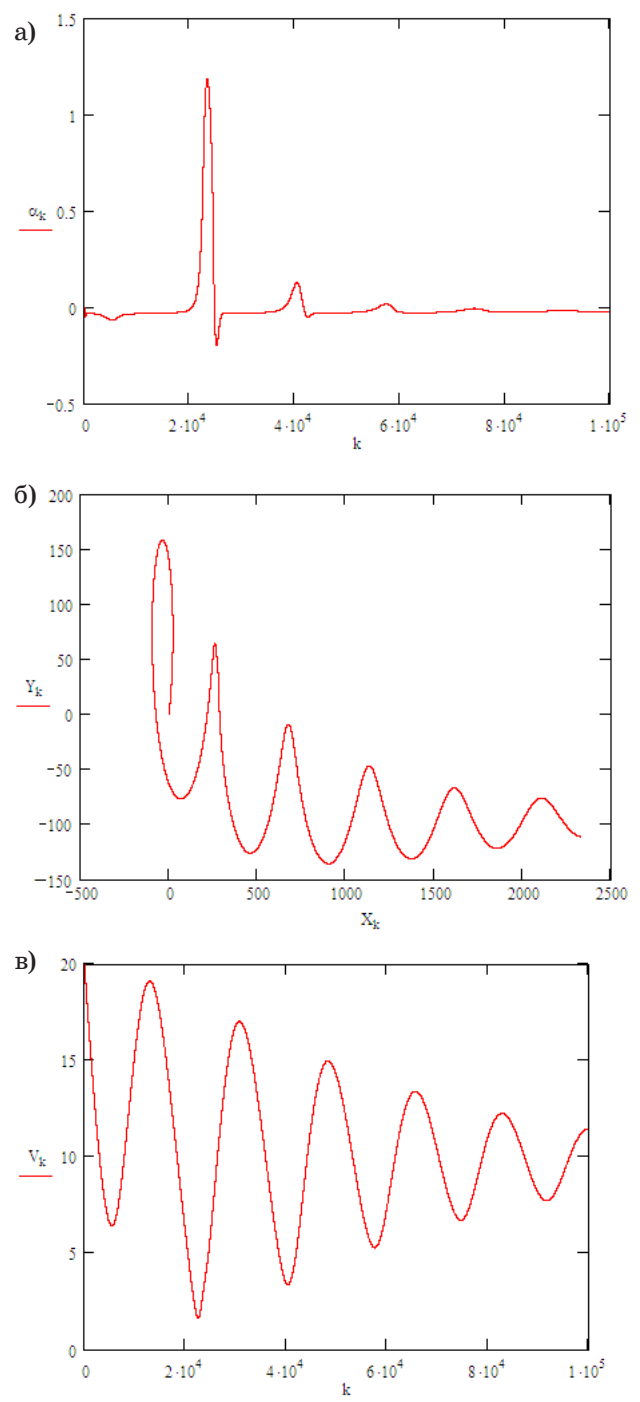


Рис. 3. Параметры движения ЛА с вариантом 3 начальных условий

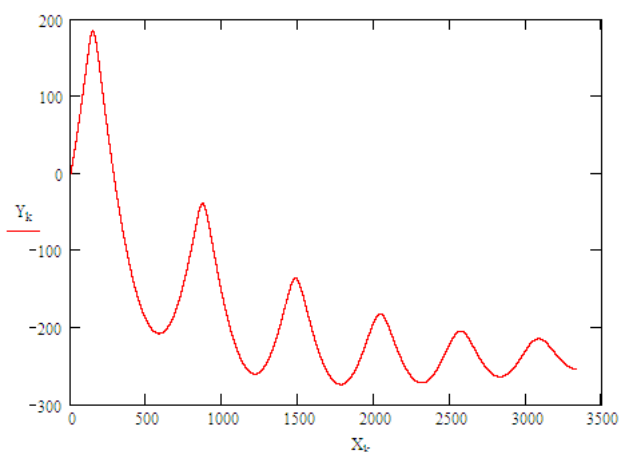


Рис. 4. Траектория ЛА с линейризацией нелинейностей

переходит в резкий набор высоты и выполняет «мертвую» петлю, после чего периодически повторяется затухающий процесс с кабрированием. Рис. 3 соответствует запуску ЛА вдоль условной линии с большим углом возвышения и несколько меньшей начальной скоростью. Видно, что ЛА сначала совершает набор высоты, но затем происходит потеря скорости, переворот, разгон, кабрирование с последующим повторением процесса с затуханием. Заброс α и потеря скорости оказываются больше чем в преды-

дущем случае (сильнее выраженное сваливание). Во всех трёх случаях происходит выход ЛА на критические (закритические) углы атаки с потерей скорости. Форма траектории колебательного движения отличается от гармонической (с учётом поправки на изменение средней высоты).

Для сравнения, на рис. 4 показана траектория, полученная по уравнениям продольного движения с выполненной линейризацией нелинейностей относительно угловых величин, для тех же начальных условий как на рис. 3. Видно, что траектория существенно отличается по форме. В отличие от нелинейной модели, здесь не воспроизводится процесс выхода на закритические углы атаки с глубокой потерей скорости и сваливанием на первом цикле кабрирования.

Библиографический список

1. Авионика России: энциклопед. справ. / под общ. ред. С. Д. Бодрунова. СПб.: НААП, 1999. 780 с.
2. Степанов О. А. Введение в теорию оценивания. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 496 с.
3. Гарбузов В. М., Ермаков А. Л., Кубланов М. С. и др. Аэромеханика: учеб. для студ. вузов. М.: Транспорт, 2000. 287 с.
4. Арепьев А. Н. Проектирование легких пассажирских самолетов. М.: Изд-во МАИ, 2006. 640 с.

УДК 629.7.058.4

Д. А. Воропаева*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Рассмотрены методы контроля работоспособности микромеханических акселерометров на производстве и при эксплуатации. В качестве объекта исследования выбран маятниковый микромеханический акселерометр компенсационного типа с электростатической обратной связью. В пакете Matlab Simulink разработана и проверена на работоспособность система встроенного контроля.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр, маятниковый акселерометр, система встроенного контроля, контроль работоспособности акселерометра.

D. A. Voropaeva*

Postgraduate Student

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INVESTIGATION OF METHODS FOR MONITORING THE PERFORMANCE OF MICROMECHANICAL ACCELEROMETERS

Methods for monitoring the performance of micromechanical accelerometers in production and operation are considered. A pendulum micromechanical accelerometer of a compensating type with electrostatic feedback was chosen as the object of research. The built-in control system has been developed and tested in the Matlab Simulink package.

Keywords: micromechanical accelerometer, pendulum accelerometer, built-in control system, monitoring the performance of accelerometer.

В настоящее время микромеханические датчики (ММД) нашли широкое применение в авиационном приборостроении в качестве сенсоров – устройств, которые переводят те или иные физические воздействия в электрический сигнал в измерительных и управляющих системах. Помимо авиационного приборостроения, они находят широкое применение в автомобильной электронике, робототехнике, медицине и других областях.

Для оценки состояния ММД, а также контроля их метрологических характеристик используются различные методы, которые условно можно разделить на методы контроля на производстве и при эксплуатации. Особенно актуальным является встроенный контроль ММД на борту летательного аппарата.

В качестве объекта исследования выбран маятниковый микроакселерометр компенсационного типа с электростатической обратной связью. Структурная схема исследуемого ММД показана на рис. 1 [1].

Измеряемое ускорение воздействует на чувствительный элемент (ЧЭ) – инерционную массу (ИМ), подвешенную на упругих подвесах –

балках. ЧЭ под действием внешних сил отклоняется от продольной оси, что вызывает угловое смещение маятника ϑ , которое преобразуется в линейное перемещение пластин конденсаторов преобразователя перемещений Δh . На выходе преобразователя образуется напряжение ΔU , которое поступает на вход фильтра низких частот (ФНЧ), где полезный сигнал выделяется на фоне помех. После ФНЧ сигнал проходит через усилитель, где увеличивается его амплитуда до достаточной для восприятия другими устройствами. Затем по линии отрицательной обратной связи полученный сигнал поступает на электростатический датчик, где преобразуется в силу, идущую на сумматор.

Передаточная функция маятника по отношению к угловой и линейной вибрациям W :

$$W = \frac{K_{\text{ПМ}}}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ПМ}}$ – чувствительность маятника; T – период собственных колебаний маятника; ξ – относительный коэффициент демпфирования; s – оператор Лапласа.

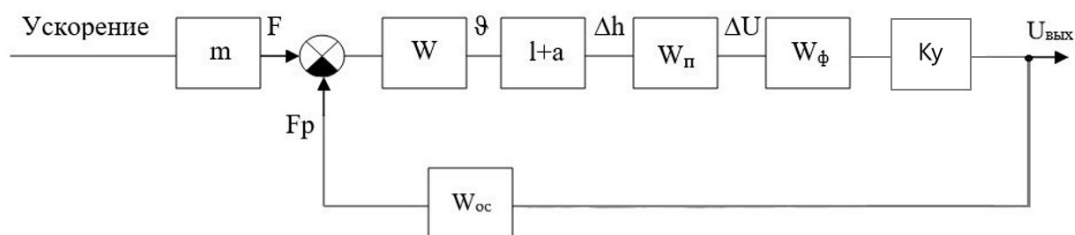


Рис. 1. Структурная схема маятникового акселерометра с электростатической обратной связью

Передаточная функция измерительной цепи емкостного преобразователя:

$$W_{\Pi} = \frac{\Delta U}{\Delta h}, \quad (2)$$

где ΔU – напряжение в измерительной диагонали моста; Δh – изменение расстояния между подвижным и неподвижным электродами.

Передаточная функция ФНЧ второго порядка:

$$W_{\phi} = \frac{\frac{R_2}{R_1}}{\omega_c^2 R_3 R_2 C_1 C_2 s^2 + \omega_c C_1 (R_3 + R_2 + \frac{R_2 R_3}{R_1}) s + 1}, \quad (3)$$

где ω_c – частота среза; C_1, C_2 – емкости конденсаторов; R_1, R_2, R_3 – сопротивления резисторов.

Передаточная функция канала ОС:

$$W_{OC} = \frac{F_p}{U_{\text{вых}}}, \quad (4)$$

где F_p – сила, сформированная электростатическим датчиком; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение измерительной цепи.

Коэффициент усиления сигнала:

$$K_y = \frac{U_{0y}}{U_1 - U_2}, \quad (5)$$

где U_{0y} – выходной сигнал усилителя; $U_1 - U_2$ – входной дифференциальный сигнал усилителя.

Заключительным этапом создания изделия является опытное и серийное производство, которое сопровождается контролем продукции на всех стадиях технологического процесса [2].

Контроль на производстве – это оценка инструментальных характеристик изготавливаемой продукции.

Виды контроля, а также объем и содержание входящих в него испытаний зависят от типа производства (рис. 2) и регламентируются согласно государственному стандарту (ГОСТ) 16504-81 [3].

Содержание, последовательность и характер испытаний регламентируются ГОСТом, техническим условием (ТУ), техническим требованием (ТТ), временным техническим условием (ВТУ), которые могут быть уточнены в процессе производства и эксплуатации. ГОСТы, ТУ, ВТУ и инструкции содержат все проверочные комплексы, соответствующие условиям работы, транспортировки и хранения изделий, а также методику и программу испытаний.

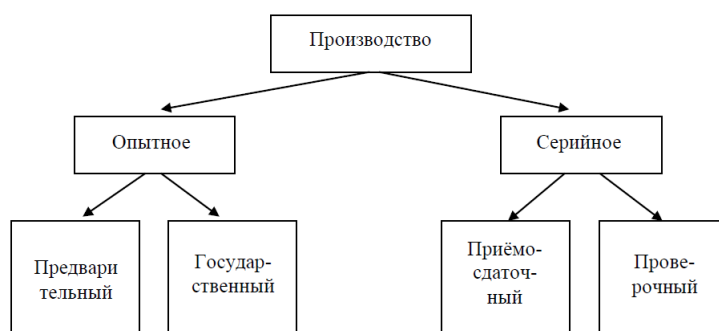


Рис. 2. Схема зависимости вида контроля от типа производства

Существуют следующие методы контроля микроакселерометров (МА) на производстве [4]:

1) *с помощью вибростендов*. Основная задача вибростенда заключается в создании таких же виброускорений, которые возникают при эксплуатации МА. Чаще всего применяются одноосные вибрационные стенды, у которых возможно поддержание стабильных частоты и амплитуды. При этом рядом с исследуемым датчиком устанавливается образцовый прибор, заведомо более точный и принимаемый за эталон;

2) *с помощью поворотного стенда*. Малые значения ускорения (в пределах $(\pm g)$) задаются статически поворотами на делительной головке. Для воспроизведения центробежного ускорения используются поворотные или роторные стенды;

3) *с помощью центрифуги*. Центрифуги используют для определения зависимости выходных сигналов и параметров МА от линейных ускорений, которые значительно превосходят по величине ускорение силы тяжести. Величину линейного ускорения можно регулировать изменением угловой скорости вращения центрифуги и радиуса вращения;

4) *с помощью копер*. Ударные нагрузки реализуются на так называемых копрах, представляющих собой установки со свободно падающими ложементами, на которых закрепляются испытуемые изделия. В момент удара об упругие наковальни ударное ускорение возрастает от нуля до максимального значения, после чего уменьшается до минимальной величины;

5) *с помощью виброфуги*. Для создания комплексного механического воздействия, состоящего из вибрации и постоянного ускорения, используют виброфуги – сложное и дорогостоящее испытательное оборудование, полученное соединением центрифуги и вибростенда.

Самым простым методом контроля при эксплуатации является аппаратный контроль по принципу «есть/нет», когда исправность элемента определяется наличием или отсутствием информации.

Помимо этого, существуют следующие методы контроля МА [5]:

1) *по насыщению* – контролируется значение выходного сигнала акселерометра, соответствующее максимальному измеряемому ускорению, поступающее на вход преобразователя. Если происходит превышение максимального значения в течение определенного периода времени, фиксируется отказ датчика;

2) *по среднеквадратическому значению* – контролируется среднеквадратическое значение ускорения по всем трем осям, измеряемого

триадой акселерометров бесплатформенной системы ориентации и навигации;

3) *по значению потребляемого тока* – контролируется его величина (отличная от нулевого потребления), а также соответствие значения допустимого напряжения установленному диапазону. Если происходит превышение пределов диапазона, фиксируется отказ датчика.

В данной статье рассмотрен метод контроля, описанный в патенте РФ № 2244271 [6], в котором предлагается способ контроля качества микромеханических устройств.

В модели датчика реализуется встроенный контроль, который осуществляется за счет подачи опорного напряжения на пластины конденсатора. В этом случае между неподвижными и подвижными пластинами возникает электростатическая сила, которая вызывает перемещение ИМ (подвижных пластин). В результате на выходе системы появляется сигнал, свидетельствующий о работоспособности датчика. Таким образом, данный метод контроля позволяет имитировать воздействие ускорения за счет формирования электростатической силы путем подачи опорного напряжения (так называемый, метод подачи пробного сигнала).

Расчеты параметров исследуемого акселерометра, необходимые для дальнейшего моделирования, произведены в работе. Были получены следующие значения.

1. Передаточная функция ЧЭ:

$$W = \frac{0,0005}{0,0025s^2 + 0,0136s + 1}.$$

2. Передаточная функция, отображающая преобразование угловых колебаний маятника в линейное перемещение пластин емкостного преобразователя, $l + a = 0,005$.

3. Передаточная функция емкостного преобразователя $W_{\Pi} = 250\,000$.

4. Передаточная функция ФНЧ 2-го порядка:

$$W_{\Phi} = \frac{1}{0,1362s^2 + 0,618s + 1}.$$

5. Коэффициент усиления $K_y = 6$.

6. Передаточная функция канала ОС:

$$W_{OC} = \frac{0,00005}{1}.$$

На рис. 3 показана схема измерительной цепи исследуемого маятникового акселерометра в пакете Matlab Simulink. Реализуем подачу опорного напряжения на пластины конденсатора в виде единичного скачка с помощью блока Step.

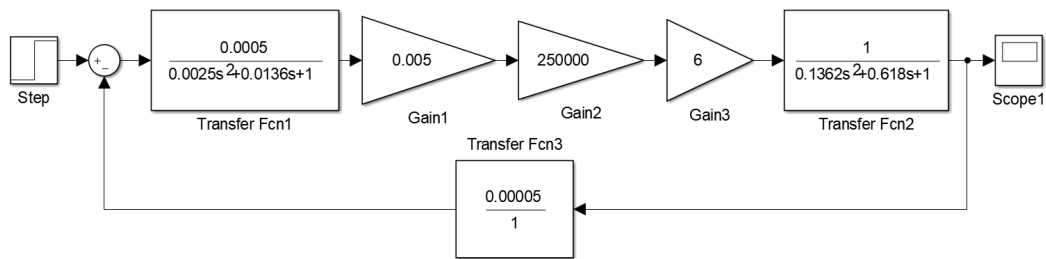


Рис. 3. Измерительная цепь исследуемого акселерометра при подаче единичного скачка

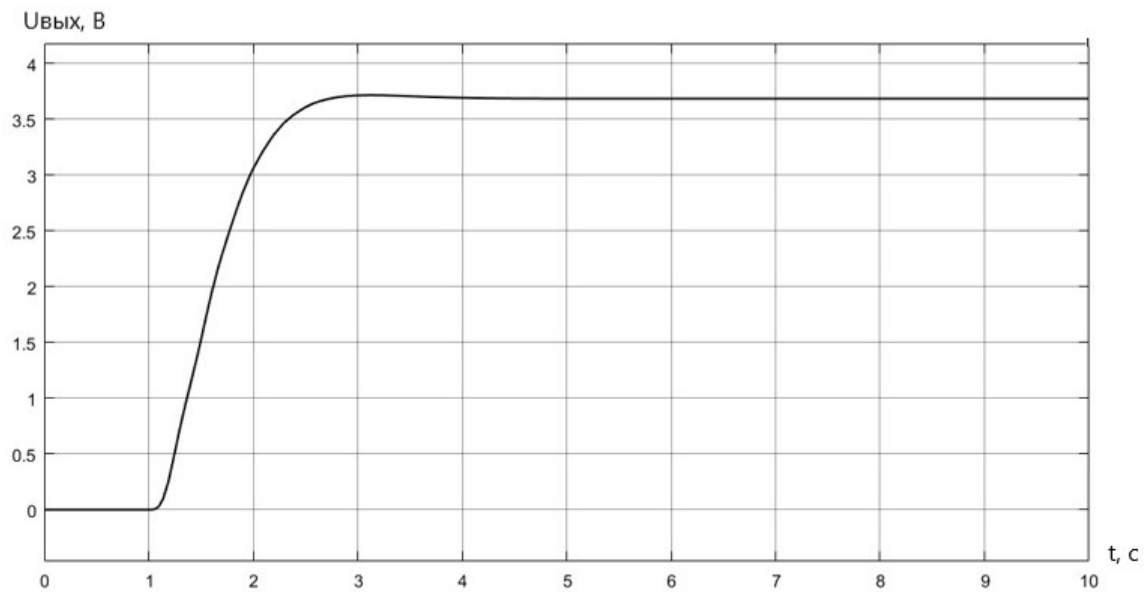


Рис. 4. Выходной сигнал при подаче единичного скачка

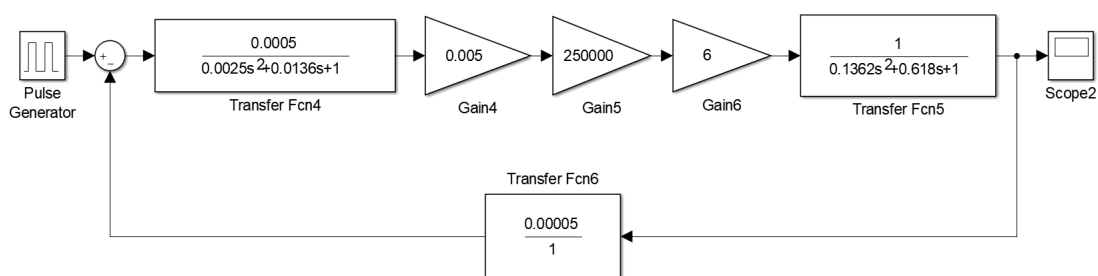


Рис. 5. Измерительная цепь исследуемого акселерометра при подаче периодически повторяющегося ступенчатого сигнала

Сигнал, полученный на выходе, приведен на рис. 4.

Затем вместо единичного скачка подадим периодически повторяющийся ступенчатый сигнал с помощью блока Pulse Generation.

На выходе схемы, изображенной на рис. 5, получим следующий отклик (рис. 6).

Таким образом, на рис. 4; 6 изображен выходной сигнал измерительной цепи МА, свидетельствующий о работоспособности датчика, а

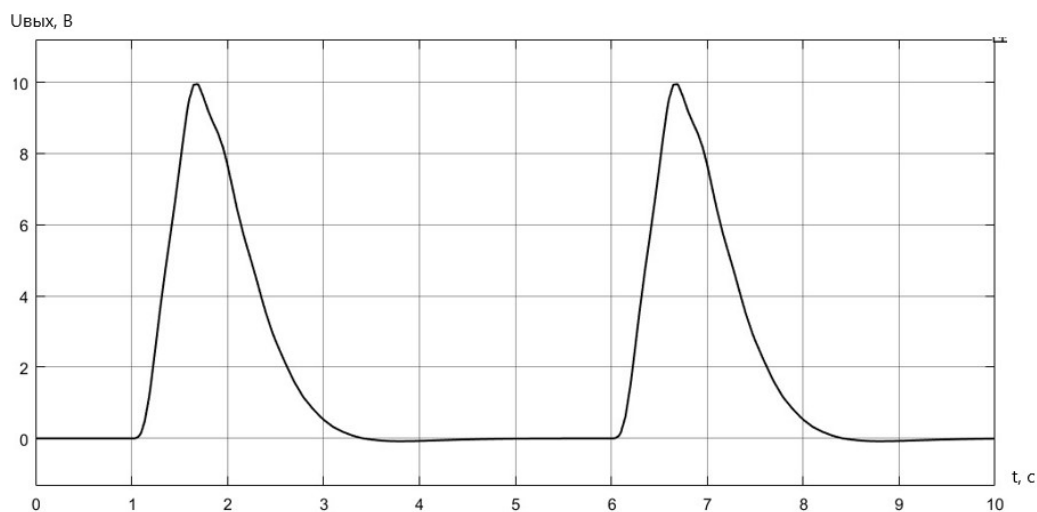


Рис. 6. Отклик системы на выходе при подаче периодически повторяющегося ступенчатого сигнала

также о работоспособности разработанной модели встроенного контроля. Из этого следует, что рассмотренный метод контроля действительно позволяет имитировать воздействие ускорения на ИМ без использования вибростенда, центрифуги и других средств контроля МА.

Библиографический список

1. Распопов В. Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.
2. Гаврилов А. Н. Технология авиационного приборостроения. М.: Машиностроение, 1981. 481с.

3. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. М.: Стандартиформ, 2011. 23 с.

4. Аврутов В. В. Испытания инерциальных приборов: учеб. пособие. Киев: НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского», 2016. 205 с.

5. Карасева Е. А., Корнилов А. В. Методы контроля и резервирования датчиков первичной информации. Системы ориентации и навигации летательного аппарата // Приволж. науч. вестн. 2015. № 12-3 (52). С. 36–41.

6. Способ контроля качества изготовления микромеханических устройств: патент 2244271 Рос. Федерация: G 01 Н 11/06, В 81 С 5/00.

УДК 623.743

А. П. Григорьев*

старший преподаватель

В. В. Яшагина*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИРИЖАБЛЯ

Предлагается рассмотреть решение ряда проблем для проектирования дирижабля для применения в задачах радионаблюдения. Произведен расчет аэростатических характеристик, определена подъемная сила и максимальная грузоподъемность дирижабля. Проведены исследования зависимости изменения подъемной силы от увеличения массы полезной нагрузки, а также подъемной силы и прочности обшивки при утяжелении конструкции в процессе образования ледяного покрова.

Ключевые слова: дирижабль, аэростатика, подъемная сила, прочность.

A. P. Grigoryev*

Senior Lecturer

V. V. Yashagina*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INVESTIGATION OF AEROSTATIC CHARACTERISTICS OF AIRSHIP

In this paper, it is proposed to consider the solution of a number of problems for the design of airship for use in radio surveillance tasks. The calculation of the aerostatic characteristics of the SPA was carried out, the lifting force and the maximum carrying capacity of the airship were determined. The studies of the dependence of the change in the lift force on the increase in the payload mass, as well as the lifting force and strength of the skin when the structure becomes heavier during the formation of the ice cover.

Keywords: airship, aerostatic, lifting force, strength.

Введение

Дирижабль (от фр. «dirigeable» – «управляемый») – управляемый летательный аппарат (ЛА) с двигателем (двигателями), у которого большая часть или весь вес уравнивается аэростатической (Архимедовой) подъемной силой [1].

Дирижабли сочетают в себе все современные возможности ЛА самолетного и вертолетного типов. Благодаря этому могут быть использованы для гражданского применения: грузоперевозок, мониторинга линий электропередач, трубо-, газо- и нефтепроводов, для туристических полетов, в качестве может ретранслятора в сетях радиосвязи.

Очевидны перспективы использования в научно-исследовательских задачах, которые предполагают организацию экспедиций и освоение труднодоступных регионов (к примеру, Арктики и Антарктики), реализацию различного рода наблюдений (метеорологического, геологического, биологического, орнитологического и пр.) и измерений параметров окружающей среды (состава воздуха, тем-

пературы, давления окружающей среды и пр.) [2].

Ознакомившись с результатами работ [1, 2], а также проанализировав, с учетом специфики выполняемой дирижаблем задачи, все возможные модели жесткой схемы, автором выбран в качестве прототипа LZ-127 «Граф Цеппелин», построенный в 1928 г. и являющийся одним из крупнейших дирижаблей до настоящего времени (таблица).

Расчет аэростатических характеристик дирижабля

Для расчета грузоподъемности ДСН необходимо рассчитать его подъемную силу. Конструкция дирижабля содержит мешки, которые наполнены газом. В качестве газа используются водород, гелий или блаугаз. Лучшим сочетанием является смесь гелия и водорода в соотношении 85 к 15% соответственно. Данное сочетание не взрывоопасно и эффективно [3].

Для расчета подъемной силы дирижабля, наполненного вышеописанной смесью, использу-

Основные характеристики прототипа дирижабля

Характеристика	Цеппелин LZ-127 «Граф Цеппелин»
Система/объем, м ³	Жесткая/105000
Год постройки	1928
Максимальная/крейсерская скорость, км/ч	128/115
Наибольшая высота, м	7000
Радиус действия, км	10 000 при 15 т нагрузке
Полезная нагрузка/средняя, т	25–55/ 30
Длина дирижабля, м	236,6
Диаметр (максимальный) дирижабля, м	30,5
Несущий газ	Водород, гелий и/или газ Блау
Число газовых отсеков, шт.	17
Силовая установка (марка и модель)/число двигателей и мощность, л. с.	Майбах VL II/ 5*530
Размеры гондолы (L×B×H), м	40×6×2,25
Наработка, ч	17 200

ется закон Архимеда. Вся масса дирижабля является суммой каждого элемента, летательного аппарата и описывается уравнением

$$m_{\partial} = m_{\text{констр}} + m_{\text{об}} + m_{\text{су}} + m_{\text{т}} + m_{\text{пн}},$$

где $m_{\text{констр}}$ – конструкция; $m_{\text{об}}$ – оборудование; $m_{\text{су}}$ – силовая установка; $m_{\text{т}}$ – топливо; $m_{\text{пн}}$ – полезная нагрузка (20 000 кг) [4].

$$\begin{aligned} B = G &\Rightarrow v_{\Gamma} \rho_{\text{в}} g = (m_g + v_{\Gamma} \rho_{\text{в}}) g; \\ v_{\Gamma} \rho_{\text{в}} &= (m_g + v_{\Gamma} \rho_{\text{в}}) \Rightarrow m_g = v_{\Gamma} \rho_{\text{в}} - v_{\Gamma} \rho_{\Gamma}; \\ m_g &= v_{\Gamma} (\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma}); \end{aligned} \quad (1)$$

$v_{\Gamma} = 105000 \text{ м}^3$ (объем газа в оболочке – max), $\rho_{\text{в}} = 1,19 \text{ кг/м}^3$ (для $H = 200 \text{ м}$, $T_{\text{вх}} = 15^{\circ}\text{C}$), $\rho_{\text{H}_2} = 0,09 \text{ кг/м}^3$ (водород при $H = 0 \text{ м}$, $T_{\text{вх}} = 0^{\circ}\text{C}$), $\rho_{\text{He}} = 1,1 \text{ кг/м}^3$.

Произведенный расчет плотности смеси газов по формуле $\rho_{\Gamma} = \rho_{\text{H}_2} \omega_1 + \rho_{\text{He}} \omega_2$, где ω_1, ω_2 – весовые коэффициенты объема газа в газовых баллонах, показал, что суммарная плотность используемого газа равна $\rho_{\Gamma} = 0,1665 \text{ кг/м}^3$.

Подставив значение плотности смеси газов в уравнение (1) получаем массу дирижабля, равную

$$\begin{aligned} m_{\partial} &= v_{\Gamma} (\rho_{\text{в}} - \rho_{\Gamma}) = \\ &= 105000 \text{ м}^3 (1,19 \text{ кг/м}^3 - 0,1665 \text{ кг/м}^3) = 107467 \text{ кг}. \end{aligned}$$

При полученных данных сила тяжести дирижабля G и аэростатическая сила B получаются равными 1224510 Н.

$$\begin{aligned} G_1 &= (m_{\partial} + v_{\Gamma} \rho_{\Gamma}) g = \\ &= (107467 \text{ кг} + 105000 \text{ м}^3 \cdot 0,1665 \text{ кг/м}^3) \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 = \\ &= 1224510 \text{ Н}; \end{aligned}$$

$$B = v_{\Gamma} \rho_{\text{в}} g = 105000 \text{ м}^3 \cdot 1,19 \text{ кг/м}^3 \cdot g = 1224510 \text{ Н}.$$

Подъемная сила дирижабля описывается следующим условием $Y_1 = B - G_1 = 0$ и полученные данные полностью ему удовлетворяют.

Выявление зависимости подъемной силы от изменения массы комплекса. Так как данная полезная нагрузка включает в себя РЛС с РСА для обзора земной поверхности на большие расстояния, оптико-электронную аппаратуру (системы фото и видеонаблюдения видимого и инфракрасного диапазона), дополнительную обеспечивающую аппаратуру (антенна-ретрансляции, высокоскоростная радиопередача, емкое долговременное механически защищенное устройство хранения информации), то оценить ее можно $m_{\text{пн}} = 20000 \text{ кг}$. Без данного комплекса масса дирижабля будет равна

$$m_{\partial} = m_{\text{нч}} - m_{\text{пн}} = 107467 \text{ кг} - 20000 \text{ кг} = 87467 \text{ кг}.$$

Тогда сила тяжести составляет

$$\begin{aligned} G_2 &= (87467 \text{ кг} + 105000 \text{ м}^3 \cdot 0,1665 \text{ кг/м}^3) \times \\ &\times 9,8 \text{ м/с}^2 = 1028505,1 \text{ Н}. \end{aligned}$$

А подъемная сила, необходимая на подъем данной нагрузки –

$$Y_2 = 1224510 \text{ Н} - 1028505,1 \text{ Н} = 196004,9 \text{ Н};$$

$$Y_2 = 20000 \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 = 196004,9 \text{ Н} \rightarrow Y_2 = m_{\text{пн}} g.$$

В качестве альтернативного топлива для сравнения была рассмотрена смесь водорода и блау-газа в соотношении 71,4% водорода и 28,6% газа блау. Результат показал, что данным топливом можно поднять груз на 127,5 кг больше, что является не особо значимым различием по грузоподъемности. Но безопасность играет

первостепенную роль, поэтому выбором в данной работе стал гелий.

Расчет высоты, на которую поднимается дирижабль.

Образование ледяного покрова на летательных аппаратах – также важный вопрос при проектировании систем управления движением. Дирижабль долгое время находится на большой высоте, окруженный облаками и низкими температурами, из-за чего и появляется слой льда на обшивке, так как переохлажденные капли влаги могут замерзать на поверхности и при $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5].

За начальную точку принята высота в 1000 м. Согласно [3], масса льда, образующегося на обшивке, может достигать 13000 кг.

$$v_a(t) = \int (g - a) dt,$$

$v_a(t)$ – скорость подъема дирижабля с учетом обледенения:

$$v_a(t) = gt - at = t(g - a).$$

Высота, на которую может подняться дирижабль:

$$h_1 = \int V_a(t) dt = \int (g - a) t \cdot dt = (g - a) \int t \cdot dt = \frac{g - a}{2} t^2 + h_0 - g \gamma_{\text{тр.атм}} \frac{t^2}{2}, \quad (2)$$

где $\gamma_{\text{тр.атм}}$ – коэффициент воздушного трения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $a = 3 \text{ м/с}^2$ [3].

Скорость подъема дирижабля с учетом обледенения и массы полезной нагрузки:

$$v_a^*(t) = \int \frac{g}{1 - \frac{m_{\text{льда}}}{m_{\text{пн}}}} dt = \frac{gt}{1 - \frac{m_{\text{льда}}}{m_{\text{пн}}}}. \quad (3)$$

Высота, на которую поднимается дирижабль с учетом обледенения:

$$h = \int v dt = \int \frac{gt}{1 - \frac{m_{\text{льда}}}{m_{\text{пн}}}} dt = \frac{gt^2}{2 \left(1 - \frac{m_{\text{льда}}}{m_{\text{пн}}} \right)} + h_0 - g \gamma_{\text{тр.атм}} \frac{t^2}{2};$$

$$h = \frac{gt^2}{2} \left[\frac{1}{1 - \frac{m_{\text{льда}}}{m_{\text{пн}}}} - \gamma_{\text{тр.атм}} \right] + h_0. \quad (4)$$

Рассчитанные ранее аэростатические характеристики прототипа ДСН в зависимости от массы полезной нагрузки и при утяжелении конструкции в процессе образования ледяного покрова необходимо проверить средствами имитационного математического моделирования Matlab Simulink (рис. 1–4).

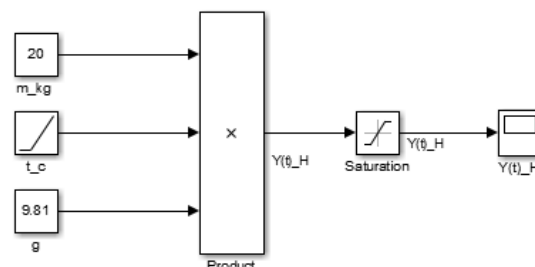


Рис. 1. Имитационная схема аэростатических характеристик прототипа дирижабля

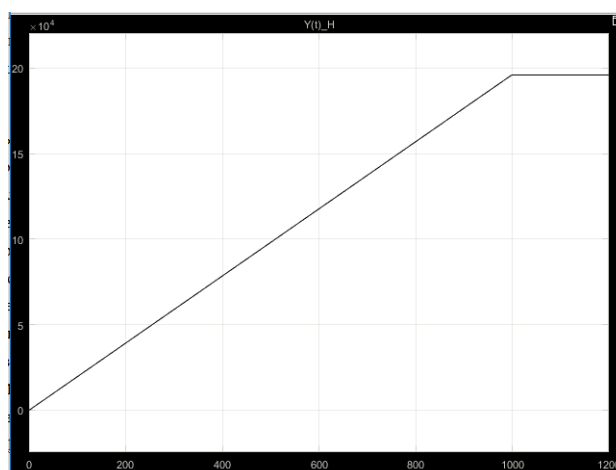


Рис. 2. График зависимости изменения подъемной силы дирижабля от массы полезной нагрузки

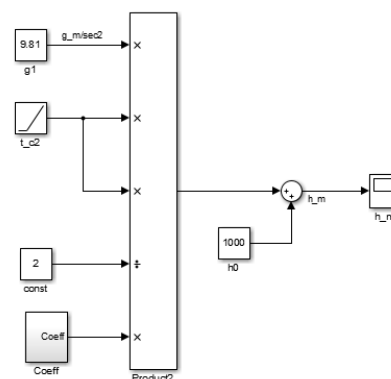


Рис. 3. Имитационная схема аэростатических характеристик прототипа снаряженного дирижабля с учетом образования ледяного покрова ($M_{\text{льда}} = 13000 \text{ кг}$)

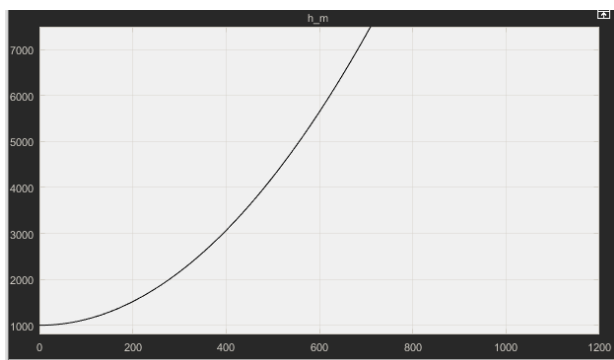


Рис. 4. График зависимости изменения подъемной силы снаряженного дирижабля при утяжелении за счет образования ледяного покрова

Прочность конструкции прототипа дирижабля

На рис. 5–8 показаны результаты виртуальных экспериментов прототипа дирижабля в пакете моделирования CosmosWorks. Массогабаритные размеры, используемые при имитационном моделировании выбраны в соответствии с данными таблицы. В качестве нагрузки рас-

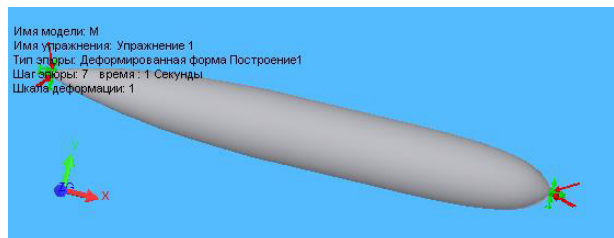


Рис. 5. Построение эпюры: деформированная форма

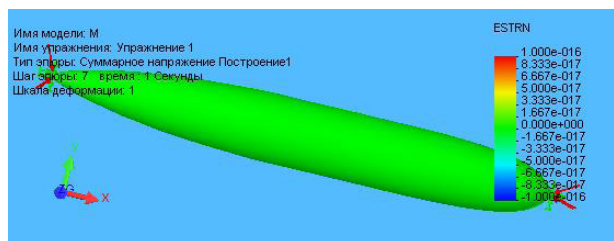


Рис. 6. Построение эпюры: суммарное напряжение

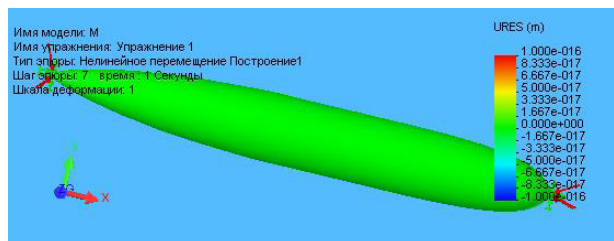


Рис. 7. Построение эпюры: нелинейное перемещение

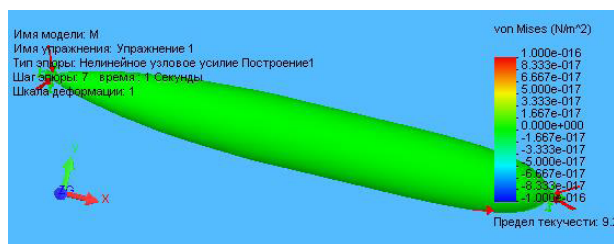


Рис. 8. Построение эпюры: усилие сжатия

сматривается утяжеления дирижабля вследствие образования ледяного покрова.

В результате проведенного виртуального эксперимента подтверждена прочность конструкции дирижабля при воздействии нагрузки в виде образованного ледяного покрова массой 13000 кг.

Заключение

В работе были проведены исследования аэро-статических характеристик дирижабля, его подъемной силы и ее изменений в зависимости от используемой смеси газов и массы полезной нагрузки, а также при образовании ледяного покрова. Полученные результаты говорят об эффективности используемых газов, высокой грузоподъемности и надежности.

Проведено исследование прочности оболочки дирижабля при образовании слоя льда на обшивке летательного аппарата путем моделирования в CosmosWorks. Проведенные эксперименты показали, что данная конструкция является прочной и выдерживает данную нагрузку на его оболочку.

Библиографический список

1. Кирилин А. Н. Дирижабли. М.: МАИ, 2013. 405 с.
2. Григорьев А. П., Колесников Д. Г. Современное дирижаблестроение. Мировой опыт использования и перспективы применения // Труды VII науч.-техн. конф. молодых специалистов ФГУП «КБ „Арсенал“»; Балт. гос. техн. ун-т. СПб.: Инфо-да, 2016. С. 277–280.
3. Грумондз В. Т., Семенчиков Н. В., Яковлевский О. В. Аэромеханика дирижабля. М.: Наука, 2017. 424 с.
4. Щербаков Ю. В. Теория полета дирижаблей: краткий курс. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 80 с.
5. Обледенение летательных аппаратов. URL: <http://avia-simply.ru/obledenienie-letatelnykh-apparatov/> (дата обращения: 28.11.2020).

УДК 621.396.967; 621.396.969.14; 629.7.05 Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-26-32

В. Н. Коврегин*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Г. М. Коврегина*

кандидат технических наук

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АДАПТИВНО-РОБАСТНЫЕ МЕТОДЫ РАДИОЛОКАЦИОННО-ИНЕРЦИАЛЬНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЯХ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО ЛЧМ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Предложены методы, направленные на повышение помехоустойчивости, точности и оперативности многоцелевого активного автосопровождения воздушных объектов в условиях интенсивного маневрирования, мощных мешающих отражений, ложных целей и редких радиолокационных «опросах» объектов. Методы основаны на адаптивно-робастных процедурах управления квазинепрерывным ЛЧМ-излучением и интегрированной обработки радиолокационных и инерциальных измерений. Приведены количественные результаты, подтверждающие эффективность применения адаптивно-робастного сопровождения объектов при типичных условиях и параметрах авиационного импульсно-доплеровского радара с фазированной антенной решеткой.

Ключевые слова: радиолокационное обнаружение, захват и сопровождение, высокая частота повторения импульсов, линейная частотная модуляция несущего колебания, адаптивное управление излучением, интегрированная адаптивно-робастная обработка сигналов и данных, функциональная интеграция радиолокационных и навигационных инерциально-радиотехнических измерительно-вычислительных каналов.

V. N. Kovregin*

PhD, Tech., Senior Research Employee

G. M. Kovregina*

PhD, Tech.

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ADAPTIVE-ROBUST METHODS OF RADAR-INERTIAL TRACKING OF AIR OBJECTS WITH INTERFERING REFLECTIONS QUASI-CONTINUOUS LFM- RADIATION

Methods are proposed aimed at increasing the noise immunity, accuracy and efficiency of multipurpose active auto-tracking of air objects under conditions of intensive maneuvering, powerful interfering reflections, false targets and rare radar "interrogations" of objects. The methods are based on adaptive-robust control procedures for quasi-continuous chirp radiation and integrated processing of radar and inertial measurements. Quantitative results are presented that confirm the effectiveness of adaptive-robust tracking of objects under typical conditions and parameters of an aviation pulse-Doppler radar with a phased antenna array.

Keywords: radar detection, capture and tracking, high pulse repetition rate, linear frequency modulation of the carrier wave, adaptive radiation control, integrated adaptive-robust signal and data processing, functional integration of radar and navigation inertial-radio measuring and computing channels.

Введение

В развитии комплексов бортового оборудования летательных аппаратов (ЛТА) устойчивой тенденцией является повышение уровня интеграции датчиков, измерительно-вычислительных каналов и систем, функционирующих на основе различных физических принципов [1]. В этом ключе интенсивно развиваются радиоинерциальные навигационные системы (НС) на базе бесплатформенной инерциальной НС

(БИНС), комплексируемой на уровне сигналов и/или данных с бортовой аппаратурой спутниковых НС, доплеровским измерителем скорости и угла сноса, радиовысотомером, радиолокатором [2–4]. Также ведутся разработки по интеграции БИНС и бортовых РЛС с синтезируемой апертурой [4, 5], ориентированные на достижение высокого разрешения при картографировании. В статье рассматривается другой аспект интеграции инерциальных навигационных (ИН) и радиолокационных (РЛ) каналов –

в рамках задач обзора воздушного пространства [6, 7], а именно – при сопровождении воздушных РЛ целей (ВЦ). В настоящее время требования по повышению дальности, точности, оперативности и помехоустойчивости локализации ВЦ: обнаружении, измерении траекторных параметров актуальны и имеют тенденцию к усилению [7]. При активном РЛ сопровождении требуемая пропускная способность РЛС в настоящее время составляет десятки ВЦ и постоянно возрастает [6–8]. В такой ситуации типичны относительно длительные интервалы между «опросами» каждой ВЦ, на которых осуществляется экстраполяция ее траектории, причем на фоне интенсивного маневрирования ВЦ и ЛА. Кроме того, типична сложная сигнально-шумовая и помеховая обстановка: малые отношения «сигнал/шум» для сопровождаемых ВЦ, мешающие отражения (МО) от земли, местных предметов, метеобразований, организованные помехи и другие дестабилизирующие факторы. В рамках статьи *объект исследования* – процесс автосопровождения (АС) ВЦ, реализуемый в вышеуказанных условиях функционирования типовой авиационной бортовой РЛС с фазированной антенной решеткой в режиме излучения с высокой частотой повторения импульсов (ВЧПИ) при линейной частотной модуляции несущего колебания в пачке зондирующих импульсов (ЛЧМ). *Предмет исследования* – измерительные и информационно-технологические процессы при АС одиночной ВЦ в рамках условий и ограничений активного многоцелевого РЛ сопровождения ВЦ при ВЧПИ с ЛЧМ. *Цель* – разработка методов устойчивого радиолокационно-инерциального сопровождения ВЦ, обеспечивающих при низкой частоте «опроса» ВЦ помехоустойчивое АС цели с требуемой точностью определения ее траекторных параметров на фоне воздействия дестабилизирующих факторов, проявляющихся в виде: аномальных измерений/оценок параметров ВЦ при ее захвате и (или) на предыдущем шаге АС; наличия обнаружений/измерений по «ложным» ВЦ; существенных погрешностей прогноза траектории ВЦ при интенсивном маневрировании.

Основные подходы

Требования к дальности обнаружения/точности АС ВЦ при малых отношениях «сигнал/шум» диктуют необходимость использования режима излучения с ВЧПИ и малой скважностью. При этом требования по расширению диапазона радиальных скоростей ВЦ, включая их «зависшее» и «малоскоростное» состояние ВЦ

в условиях мощных мешающих отражений от земли (МО) ведут к необходимости использования режима ВЧПИ с ЛЧМ [9, 10], что позволяет «вынести» сигнал ВЦ за границы спектральной зоны МО. С другой стороны, при обнаружении/захвате ВЦ при ЛЧМ [9, 10] обеспечивается измерение радиального ускорения, что позволяет перейти от кинематических к динамическим алгоритмам экстраполяции траектории ВЦ. Основными подходами при достижении цели работы являются интеграция ИН-канала (БИНС) и РЛ-канала на уровне первичной (ПКОИ) и вторичной (ВКОИ) комплексной обработки информации (КОИ); переход от кинематических к динамическим алгоритмам экстраполяции траекторий ВЦ; применение адаптивно-робастных (АР) процедур управления параметрами излучения/обработки частотно-временных измерений дальности с динамической оценкой текущего индекса периода повторения импульсов (ППИ); применение АР калмановской фильтрации при оценке текущих траекторных параметров ВЦ в процессе АС.

Интеграция инерциального навигационного и радиолокационного каналов

Рассматривается интеграция БИНС и РЛ-канала на уровне первичной и вторичной обработки информации. В общем случае на этапе *первичной* обработки информации выполняется поиск, обнаружение, селекция, преобразование и усиление входных сигналов измерителей с целью определения соответствующих параметров. В процессе *вторичной* обработки выполняются преобразования над входными параметрами измерителей с целью получения навигационной, пилотажной и иной информации для систем управления полетом и других информационно-управляющих систем, включая РЛС. В настоящее время вторичная обработка информации в основном базируется на методах оптимальной калмановской фильтрации. Вторичная комплексная обработка информации дает положительный эффект лишь при «очищенных» сигналах измерителей, например, при гауссовских погрешностях измерений. В реальных условиях многие измерители, и прежде всего радиотехнические, не всегда удовлетворяют этим требованиям. Например, могут наблюдаться срывы сопровождения из-за действия помех или маневрирования. Оптимизация алгоритмов ВКОИ, как правило, не затрагивает задачу оптимизации самих измерителей с целью улучшения их технических характеристик. В общем случае

комплексная первичная обработка информации позволяет: компенсировать влияние движения носителя на работу радиотехнических измерителей, сократить время поиска сигналов; устранить или уменьшить методические погрешности, снизить или полностью исключить вероятность ложных захватов следящих измерителей, уменьшить вероятность срыва слежения за соответствующими параметрами радиосигналов; улучшить показатели точности и помехоустойчивости в режиме слежения; обеспечить режимы квазикогерентного приема и обработки радиотехнических сигналов. Таким образом, КПОИ позволяет улучшить качество функционирования радиотехнических измерителей в аномальных режимах их работы (при срывах слежения, ложных захватах, импульсных и уводящих помехах и т. д.), а также улучшить точностные характеристики в режиме слежения. На рис. 1 показана обобщенная структурная схема интегрированной системы комплексной обработки информации в инерциально-радиотехническом канале.

На рис. 1 показаны контуры слежения за фазой (КСФ) и задержкой (КСЗ); измеренная РТИ $\Theta_{\text{и}}$ и вычисленная по информации БИНС $\Theta_{\text{в}}$ фаза несущей Θ ; измеренная $\tau_{\text{и}}$ и вычисленная по информации БИНС $\tau_{\text{в}}$ задержка огибающей τ ; сигналы наблюдений фазы Z_{Θ} и задержки Z_{τ} ; преобразователь координат (ПК), обеспечивающий вычисление фазы и задержки по информации БИНС; сглаживающие фильтры с передаточными функциями $1/Tr+1$; опорный генератор, управляемый напряжением, с передаточной функцией $1/p$.

В частности, «глубокая» интеграция ИН и РЛ каналов в задаче АС ВЦ, например, позволяет:

- компенсировать фазовые искажения эхосигнала, обусловленные радиальным ускорением ЛА и приводящие к частотной модуляции сигнала, смещению и «размыванию» его спектра, снижению отношения сигнал шум и, как следствие, к ухудшению дальности обнаружения и точности РЛ измерений;

- динамически оценивать и управлять границами режекции сигнала при его обработке, исключая влияние мешающих отражений от земли и обнаружение обусловленных ими ложных целей;

- осуществить аналитическую синхронизацию неоднозначных измерений дальности

В настоящее время в задачах АС ВЦ преимущественно используются кинематические модели для экстраполяции траектории ВЦ. В отличие от них, динамические алгоритмы сопровождения: предполагают учет действующих на цель сил, причем экстраполируемая траектория должна подчиняться уравнениям движения, определяемым этими силами; позволяют осуществлять экстраполяцию параметров траектории ВЦ с высокой точностью на относительно больших интервалах времени, чем выгодно отличаются от кинематических алгоритмов. Возможность синтеза такого алгоритма для инерциально-радиолокационного сопровождения ВЦ, например, определяется следующими соотношениями.

Пусть взаимное положение ЛА и ВЦ рассматривается в осях сопровождающего трехгранни-

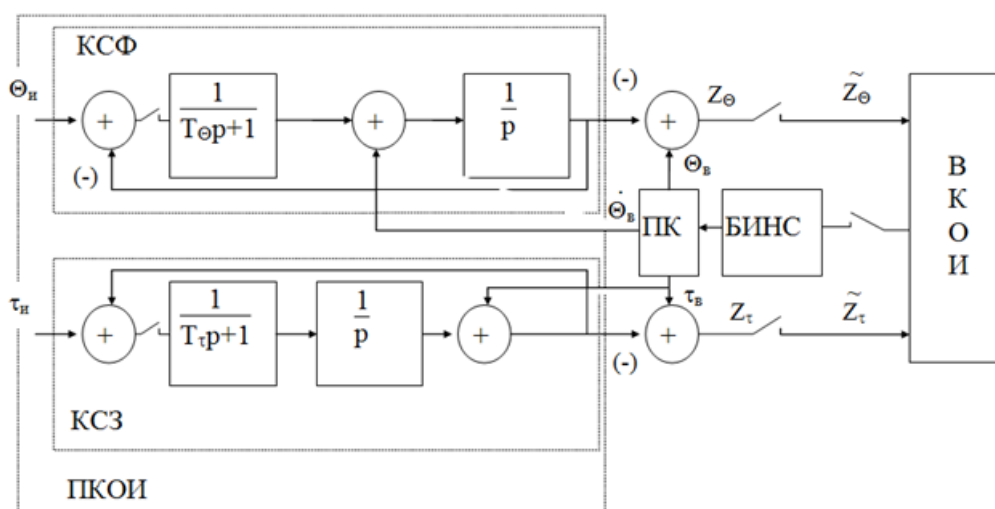


Рис. 1. Структурная схема интегрированной системы КПОИ

ка (СТ) навигационной (геодезической) системы координат, моделируемого БИНС. Тогда в режиме измерения параметров движения ВЦ вектор ее активного ускорения относительно ЛА определяется следующим образом:

$$\Delta a_u = \dot{V}_u + 2\eta * V_u + \dot{\eta} * D + \eta * (\eta * D); \quad (1)$$

где D – радиус-вектор, определяющий местоположение цели относительно фазового центра антенны РЛС; $\eta = \Omega + \omega$ – вектор абсолютной угловой скорости вращения СТ БИНС; Ω – вектор угловой скорости вращения Земли; ω – вектор угловой скорости вращения осей СТ относительно Земли.

Компоненты векторов D , $\dot{D} = \dot{V}_u$ и $\ddot{D} = \dot{V}_u$ измеряются и формируются по радиолокационной информации.

Компоненты векторов η , Ω , ω – по информации БИНС. Индекс «ц» соответствует ВЦ.

В режиме экстраполяции параметров движения цели основное уравнение радиолокационно-инерциального канала сопровождения ВЦ принимает вид:

$$\dot{V}_u = \Delta a_u - 2\eta * V_u - \eta * D - \eta * (\eta * D). \quad (2)$$

Компоненты векторов η , $\dot{\eta}$ формируются в БИНС, а компоненты остальных векторов – по запомненным в режиме измерения параметров цели значениям.

При этом комплексная первичная обработка информации может быть реализована по обобщенной схеме, показанной на рис. 1.

Адаптивно-робастные методы сопровождения

В общем случае рассматривается многоцелевое активное сопровождение ВЦ. Типичная логика функционирования РЛС квазинепрерывного излучением в заданной зоне обзора воздушного пространства показана на рис. 2. Режиму

АС предшествует пошаговый поиск/обнаружение ВЦ в заданной зоне по J направлениям, задаваемым управляющим алгоритмом (УА). После выполнения всех J шагов для каждой обнаруженной цели формируется массив данных, традиционно включающий: параметры излучения/обработки сигналов и временной привязки, при которых произошло обнаружение; первоначальные РЛ измерения (доплеровская частота ВЦ/скорость сближения; внутрипериодное положение (задержка) сигнала цели (ВППЦ)/неоднозначная дальность). УА назначает I целей для измерения/оценивания параметров ВЦ – углов ориентации дальности, скорости сближения. Для каждой назначенной цели последовательно выполняются следующие процедуры: повторное обнаружение – при тех же параметрах излучения/обработки сигнала, при которых происходило первоначальное обнаружение ВЦ; «захват» повторно обнаруженной ВЦ, понимаемый как процедура измерения/оценивания траекторных параметров ВЦ. При ВЧПИ эта процедура, в основном, сводится к устранению любым известным способом [9–11] неоднозначности индекса периода повторения импульсов (ППИ), соответствующего измерению ВППЦ. После выполнения I циклов измерения параметров УА для N целей (с измеренными параметрами) назначается режим многоцелевого автосопровождения.

Следует отметить, что предшествующие назначению АС процедуры захвата цели по дальности при ВЧПИ требуют излучения/обработки сигналов серии из нескольких пачек импульсов (от 2–3 до 15–20 пачек – в зависимости от способа дальнометрии и дальности обнаружения). После выполнения всех I шагов захвата ВЦ по дальности интервал между захватом и началом АС конкретной ВЦ может составлять несколько секунд. На таких интервалах точность экстраполяции траекторных параметров ВЦ при переходе к шагу АС может оказаться критичной.

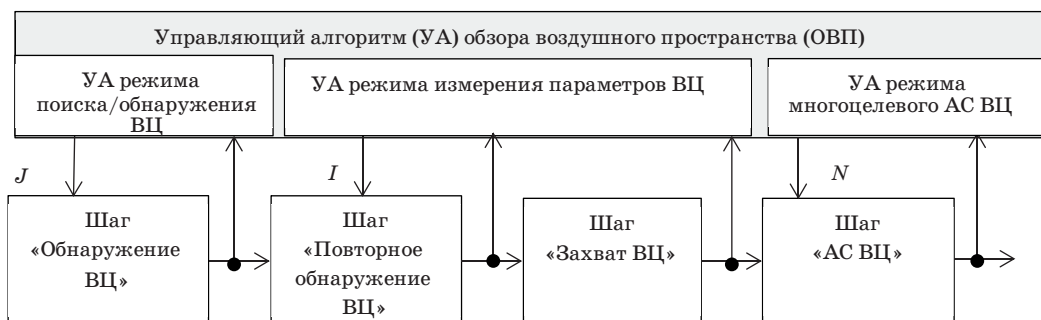


Рис. 2. Логика обзора воздушного пространства в заданной зоне

При интенсивном маневрировании ситуация усугубляется, поскольку измерения радиального ускорения ВЦ в традиционных способах захвата ВЦ отсутствуют. Известен метод [10] оперативного захвата ВЦ при ВЧПИ с ЛЧМ, требующий излучения трех пачек импульсов с варьируемой крутизной ЛЧМ и обеспечивающий измерение дальности, скорости и ускорения сближения ВЦ и РЛС. В рамках данной работы этот метод был обобщен для его реализации по технологии «скользящего окна» и использования при переходе к АС и в процессе сопровождения ВЦ. При этом каждый шаг АС завершается ЛЧМ-измерениями текущей дальности, скорости и ускорения, прежде всего, выполняемых в интересах обеспечения динамического алгоритма экстраполяции вида (2). Однако ЛЧМ-измерения дальности во многих случаях имеют точность, недостаточную для полного устранения неоднозначности по номеру ППИ, но позволяют оценить диапазон возможных дальностей ВЦ. Кроме того, в результате «грубого» захвата по дальности, кроме номинальных инструментальных погрешностей измерения ВПЦ, также может присутствовать и ошибка в определении индекса ППИ. Ошибка такого рода на входе шага АС далее может сохраняться как систематическая составляющая в течение всего сопровождения ВЦ, поскольку традиционно АС по дальности в основном заключается в отслеживании внутривысого «дрейфа» ВПЦ, обусловленного сближением, при постоянном значении ППИ, и соответствующего списания значения индекса ППИ. Эпизодически осуществляются малые вариации ППИ – для обеспечения наблюдаемости ВПЦ, т. е. смещения ВПЦ в «прозрачную» зону ППИ с тем же индексом. В любом случае после захвата на всех последующих шагах АС индекс ППИ только вычисляется, а его оценка на основании текущих измерений не выполняется. В силу этого условием, определяющим возможность постановки ВЦ на сопровождение, прежде всего, является точное определение индекса ППИ, которое должно обеспечиваться на этапе (шаге) захвата ВЦ и точно экстраполироваться на момент начала шага АС. Очевидно, что такое условие может нарушаться из-за погрешностей измерений при захвате и ошибок прогноза.

Предлагается метод АС, активный в аспекте адаптивного управления ППИ и оценки значения индекса ППИ на каждом шаге АС по текущему и предшествующему измерению ВПЦ. Управление ВПЦ обеспечивает максимально допустимое приращение ППИ, при котором гарантируется наблюдаемость ВПЦ в прозрачной зоне

ППИ для ВЦ, дальность R_{i-1} до которой по результатам захвата или предыдущего шага АС априорно задается в виде:

$$R_{i-1} = (c/2) [r_{i-1} T_{pi-1} + \tau_{i-1}], \quad (3)$$

где c – скорость распространения радиоволн; r_{i-1} и T_{pi-1} – индекс ППИ и ППИ соответственно; τ_{i-1} – внутривысого положение (неоднозначная задержка) сигнала ВЦ. Также задается диапазон от минимальной и до максимальной дальности, которой может соответствовать ВЦ в том случае, если дальность R_{i-1} определена с ошибкой индекса ППИ:

$$\begin{aligned} R_{mini-1} &= (c/2) [r_{min\ i-1} T_{pi-1} + \tau_{i-1}]; \\ R_{max\ i-1} &= (c/2) [r_{max\ i-1} T_{pi-1} + \tau_{i-1}]. \end{aligned} \quad (4)$$

При известном индексе ППИ T_{pi-1} , наличии экстраполированной (с учетом сближения) оценки ВПЦ τ_{i-1} по измерению ВПЦ τ_{i-1} в предыдущем шаге, а также экстраполированной оценки изменения индекса ППИ $\Delta r_{i/i-1} = (r_{i-1} - r_{i/i-1})$ можно прогнозировать ВПЦ τ_i^* для текущего шага АС при задаваемых приращениях ППИ $\Delta T_{pi/i-1}$ и приращения индекса ППИ $\Delta r_{i/i-1}$ на основе соотношения:

$$\tau_i^* = \tau_{i/i-1} - \Delta r_{i/i-1} T_{pi-1} - r_i \Delta T_{pi/i-1}. \quad (5)$$

Это соотношение реализуется для параметров дальности (3), минимальной и максимальной дальности (4), если исходно ошибка в определении индекса ППИ предполагалась по модулю не больше, чем $|\pm 1|$. При больших ошибках на основе выражения (5) формируется серия из M прогнозных значений ВПЦ $\tau_{i(m)}^*$, ($m=1, \dots, M$), наблюдаемых в прозрачной зоне ППИ. При получении текущего измерения ВПЦ τ_i формируется соответствующая серия невязок вида: $v_{i(m)}^* = |\tau_i - \tau_{i(m)}^*|$, ($m=1, \dots, M$). Из серии этих невязок определяется минимальная $v_{i(j_{мин})}^* = \min \{v_{i(m)}^*\}$, которой соответствует «наилучшая» в данной ситуации прогнозная модель вида (5). Таким образом, осуществляется экстраполяция ВПЦ для различных дальностей в априорно заданном диапазоне, отличающихся по индексу ППИ, определяется прогнозная модель, при которой минимален модуль ошибки прогноза и на основании параметров этой модели определяется текущее значение индекса ППИ. Далее такой способ разрешения «остаточной» неопределенности по индексу ППИ будет обозначаться как «метод минимальной ошибки прогноза ВПЦ». Наряду с адаптивным управлением наблюдением ВПЦ в заданном диапазоне дальностей этот метод обеспечивает робастность алгоритма АС ВЦ к аномальным измерениям дальности на входе шага АС – в виде гру-

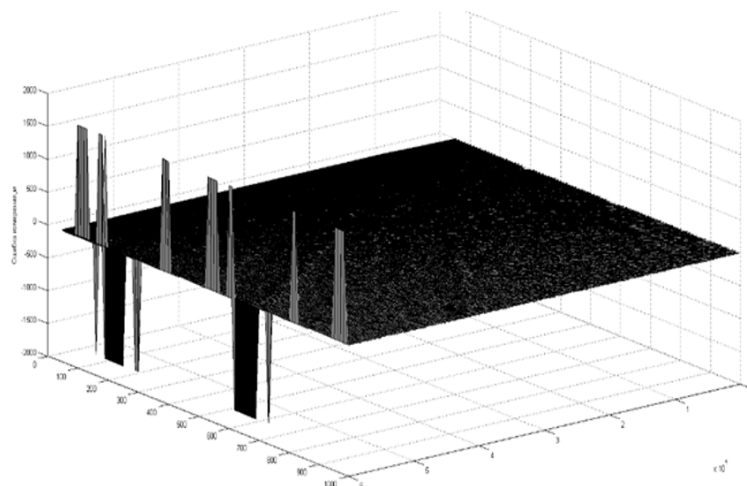


Рис. 3. Погрешности дальнометрии при скоростях сближения в диапазоне от 100 до 1000 м/с

бых ошибок, обусловленных погрешностями оценкам индекса ППИ. Очевидно, что при значительной погрешности $\delta\tau^*_{i(m)}$, прогноза $\tau^*_{i(m)}$, например, превышающей половину интервала между двумя ближайшими прогнозными оценками ВПЦ возможна неверная оценка индекса ППИ. С одной стороны, это предъявляет количественные требования к точности прогнозирования ВПЦ и, следовательно, к точности измерений ВПЦ, скорости и ускорения на предыдущем шаге. С другой стороны, определяет необходимость обеспечения второго уровня робастности как защиты от аномальных невязок

$v^*_{i(J_{\min}) i-1}$ — путем их исключения их из обработки или взвешивания. Для этого используется математический аппарат адаптивно-робастной фильтрации калмановского типа, например, рассматриваемой в работах [11, 12].

На рис. 3 показаны результаты моделирования процесса АС ВЦ по дальности после захвата ВЦ на удалении 60 км при различных начальных скоростях сближения, причем захват в ряде случаев происходил с грубыми ошибками (более 1,5 км), обусловленными неточным определением индекса ППИ. При АС интервал между пачками импульсов составлял 2 с, при-

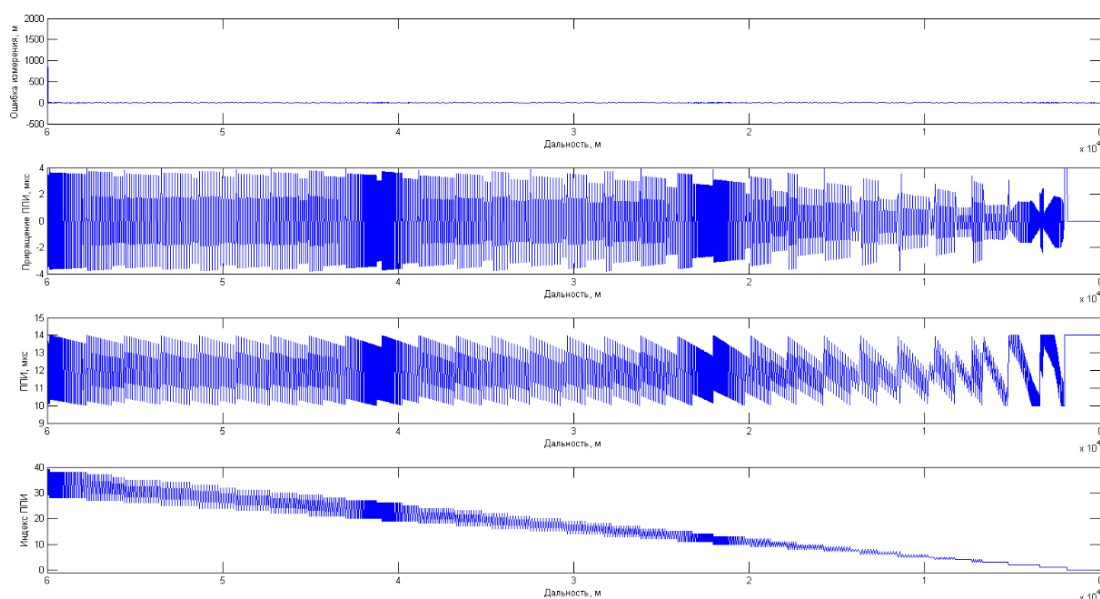


Рис. 4. Ошибки дальнометрии, приращения ППИ, ППИ и индексы ППИ в зависимости от дальности ВЦ при сопровождении ВЦ

существовало ускорение сближения, изменяющееся в диапазоне $\pm 5g$ синусоидально. При этом на вход каждого 10-го шага АС подавалась искусственно искаженная оценка дальности с погрешностью ± 1 по индексу ППИ. На рис. 4 показан один из срезов процесса захвата/сопровождения (для одной начальной скорости сближения из диапазона), отражающий ошибку дальнометрии при захвате и ошибки при АС. В процессе АС ошибки по дальности находятся в пределах инструментальных погрешностей измерения ВПЦ. На рисунке также показаны: управляемое изменение приращения ППИ; значение ППИ; изменение оценок индекса ППИ.

Библиографический список

1. Федосов Е. А. Перспективные комплексы бортового оборудования воздушных судов на базе интегрированной модульной авионики второго поколения // Навигация, наведение и управление летательными аппаратами: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. М.: Научтехлитиздат, 2012. С. 14–17.
2. Линч Д. Взгляд компании «Нортроп Грумман» на развитие навигационных технологий // Гироскопия и навигация. 2008. № 3. С. 102–106.
3. Джанджгава Г. И., Герасимов Г. И., Петкевичус П. Ю. и др. Развитие интеллектуальных интегрированных комплексов бортового оборудования навигации, управления и наведения летательных аппаратов в разработках Раменского приборостроительного конструкторского бюро // Авиакосм. приборостроение. 2008. № 2. С. 2–10.
4. Чернодаров А. В., Патрикеев А. П., Коврегин В. Н. и др. Летная отработка распределенной системы инерциально-спутниковой микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой // Науч. вест. МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 01. С. 222–231.
5. Инерциально-спутниковая система микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / А. В. Чернодаров, А. П. Патрикеев, В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // Новости навигации. 2016. № 4. С. 12–15.
6. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1: РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов / под ред. А. И. Канащенкова, В. И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2006. 656 с.
7. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / П. И. Дудник, Г. С. Кондратенков, Б. Г. Татарский, А. Р. Ильчук. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
8. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 2: Применение авиационных радиоэлектронных комплексов при решении боевых и навигационных задач / М. С. Ярлыков, А. С. Богачев, В. И. Меркулов, В. В. Дрогалин / под ред. М. С. Ярлыкова. М.: Радиотехника, 2012.
9. Коврегин В. Н., Коврегина Г. М. Способ обнаружения дальности и скорости низколетящей малоскоростной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения и инвертируемой линейной частотной модуляции: патент на изобретение № 2697509 (RU). Зарег. 15.08.2019 г.
10. Коврегин В. Н., Коврегина Г. М. Способ одновременного измерения дальности, скорости и ускорения малоскоростной маневрирующей воздушной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения импульсов и линейной частотной модуляции: патент на изобретение № 2692912 (RU). Зарег. 01.07.2019 г.
11. Чернодаров А. В., Коврегин В. Н., Рогалев А. П. и др. Адаптивно робастные U-D фильтры для интегрированных навигационных систем // Доклады участников 3-й Санкт-Петербург. Международ. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ГНЦРФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1996.
12. Чернодаров А. В., Коврегин В. Н., Сорокин Г. В. и др. Интегрированная обработка информации в бесплатформенных инерциально-спутниковых системах навигации и ориентации маневренных летательных аппаратов // Доклады участников 4-й Санкт-Петербург. Международ. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб.: ГНЦРФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1997.

УДК 621.396.967; 621.396.969.14; 629.7.05

В. Н. Коврегин*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Г. М. Коврегина*

кандидат технических наук

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИНВАРИАНТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАВИСШИХ, МАЛО- И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И НАВИГАЦИИ ПРИ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОМ ЛЧМ-ИЗЛУЧЕНИИ И МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЯХ

Предлагается адаптивный метод дальнего обнаружения воздушных объектов в режиме квазинепрерывного излучения с ЛЧМ несущей частоты, инвариантный к вариациям радиальной скорости объекта относительно земли и РЛС (в широком диапазоне скоростей сближения/удаления, включая нулевые) и спектра мешающих отражений от земли. Рассматриваются схемы и процедуры интеграции РЛС и инерциально-радиотехнической навигационной системы (с опцией микронавигации/ориентации диаграммы направленности РЛС), обеспечивающие эффективное применение методов инвариантного обнаружения неподвижных и разнородных объектов.

Ключевые слова: радиолокационное обнаружение, высокая частота повторения импульсов, линейная частотная модуляция несущего колебания, смещение и деформация спектра, адаптивное управление излучением и обработкой сигналов, адаптивно-робастная идентификация и фильтрация, комплексирование радиолокационных и навигационных каналов.

V. N. Kovregin*

PhD, Tech., Senior Research Employee

G. M. Kovregina*

PhD, Tech.

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INVARIANT DETECTION OF HANGING, LOW- AND HIGH-SPEED OBJECTS IN INTEGRATED RADAR AND NAVIGATION SYSTEMS WITH QUASI-CONTINUOUS LFM RADIATION AND INTERFERING REFLECTIONS

An adaptive method for long-range detection of air objects in the mode of quasi-continuous radiation with a carrier frequency chirp is proposed, invariant to variations in the radial velocity of the object relative to the ground and radar (in a wide range of approach / removal rates, including zero) and the spectrum of interfering reflections from the ground. The schemes and procedures for the integration of the radar and the inertial radio-technical navigation system (with the option of micromavigation/orientation of the radar beam pattern) are considered, which ensure the effective use of methods of invariant detection of stationary and different-speed objects.

Keywords: radar detection, high pulse repetition rate, linear frequency modeling of the carrier wave, spectrum shift and deformation, adaptive control of emission and signal processing, adaptive-robust identification and filtering, integration of radar and navigation channels.

Введение

В архитектуре, исполнении и реализации авиационных бортовых радаров отмечаются тенденции по разработке многофункциональных многорежимных импульсно-доплеровских РЛС с активными фазированными антенными решетками (АФАР), обеспечивающих решение задач обзора земной поверхности и воздушного пространства, информационного обеспечения

навигации, маловысотного полета, мониторинг метеорологической обстановки и других задач [1, 2]. При этом постоянно возрастают требования к точности взаимодействующих с радаром бортовых навигационных датчиков, каналов, систем (НС) и уровню их функциональной и аппаратурной интеграции с РЛС. В многофункциональных радарх с режимами синтеза апертуры антенны, как правило, возникает задача определения с требуемой высокой

точностью параметров относительной траектории движения центра (ФЦ) и ориентации диаграммы направленности (ДН) антенны РЛС на коротких интервалах, соответствующих времени накопления эхо-сигнала [3–5]. Такие задачи, обычно обозначаемые как задача микронавигации (МН) РЛС, во многих случаях являются проблемными. Одним из направлений их решения считается создание распределенных систем микронавигации [4] РЛС (СМН), в которых функциональным ядром является специализированная инерциально-спутниковая НС бесплатформенного типа в составе аппаратуры РЛС (с датчиками первичной информации, локализованными вблизи ФЦ); обеспечивается интерфейс и алгоритмическое обеспечение для информационного взаимодействия с навигационным комплексом (НК) летательного аппарата (ЛА). Методы и средства МН в настоящее время рассматриваются в аспекте их применения для информационного обеспечения РЛС в режимах землеобзора с высоким разрешением (картографирования). В данной статье РЛС и СМН рассматриваются в аспекте их интеграции применительно к задачам обзора воздушного пространства. Как объект исследования принимается процесс функционирования типовой бортовой РЛС квазинепрерывного излучения в Х-диапазоне с АФАР при поиске/обнаружении воздушных радиолокационных (РЛ) целей (ВЦ) в заданной зоне обзора в условиях мешающих отражений от земли и априорной неопределенности ВЦ. В общем случае при постановке задачи полагается, что обнаруживаемая цель может принадлежать широкому классу известных аэродинамических и аэростатических ВЦ и априорно цель может находиться в «зависшем» состоянии, приближаться/удаляться с малой или большой скоростью или быть неподвижной относительно РЛС при уравненных скоростях. На данном этапе разработки конечная прагматическая цель заключается в разработке унифицированного режима обнаружения разнотипных воздушных объектов в условиях пассивных помех, инвариантного относительно возможных траекторных состояний ВЦ по скорости (доплеровской частоте ВЦ) и относительно мощности и динамики спектра мешающих отражений. Далее в статье как объект РЛ обнаружения понимается именно такая неопределенная ВЦ – с «произвольной» радиальной скоростью в широких диапазонах положительных и отрицательных скоростей, включая нулевые. В рамках статьи предмет исследования – методы и алгоритмы управления параметрами квазинепрерывного излучения с ли-

нейной частотной модуляцией несущего колебания (ЛЧМ), обработки эхо-сигналов от ВЦ и земли, а также процедуры формирования и совместной обработки информации при функциональной интеграции РЛ- и МН-каналов в задаче обнаружения ВЦ.

Постановка задачи и проблемы при инвариантном обнаружении ВЦ

Рассматривается гипотетическая многофункциональная бортовая РЛС ЛА с АФАР типовой структуры, в составе которой предполагается распределенная СМН на базе инерциально-спутниковой НС [3–5] и обеспечивается информационное взаимодействие с НК ЛА, причем предполагается возможность использования геоинформационных систем (ГИС) – в части цифровых карт местности (ЦКМ), включая рельефные. В качестве носителя РЛС рассматривается вертолет, учитывая возможность его «зависания», в том числе и на предельно малых высотах, что обеспечивает некоторую аналогичность исследуемого процесса обнаружения ВЦ для РЛС ЛА и других вариантов базирования (например, стационарного и корабельного). РЛС решает задачу поиска/обнаружения ВЦ в заданной дальней зоне обзора – путем пошагового сканирования пространства главным лучом (ГЛ) ДН по направлениям и с параметрами излучения, задаваемым для антенного блока управляющим алгоритмом режима из вычислителя (СЦВС) радар. Полагается известной максимальная дальность обнаружения цели $R_{\text{max обн}}$, обеспечиваемая РЛС, причем считается, что: цели расположены с некоторым превышением относительно высоты ФЦ антенны РЛС; ориентация ГЛ имеет ограничения по минимальному углу места, при котором земная поверхность может облучаться только боковыми лепестками (БЛ) ДН. В таком случае направление нижней кромки ГЛ (по направлению минимума) имеет только неотрицательный угол места, а пассивные помехи от земли представляют собой мешающие отражения от участков земли, облучаемых только БЛ ДНА. Перед началом излучения считаются доступными следующие данные:

- (микро)навигационные данные: координаты, скорость, ускорение ФЦ; углы ориентации ЛА (крен, тангаж, угол рысканья) в сопровождающем трехграннике (СТ) геодезической системы координат (ГСК), геометрическая высота – от СМН и НК;

- данные о высоте над эллипсоидом в удаленной от ЛА точке с заданными геодезически-

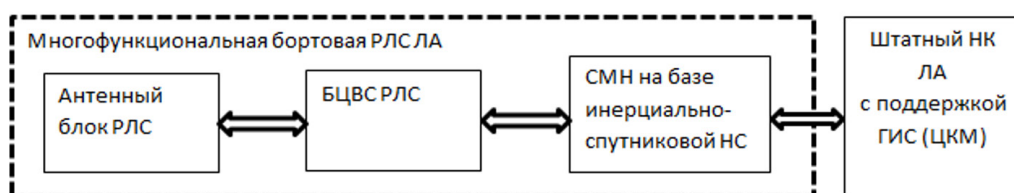


Рис. 1. Упрощенная структура информационного взаимодействия РЛС, СМН и НК

ми координатами – из цифровой карты рельефа местности ГИС, взаимодействующей с НК ЛА;

– углы ориентации направления максимума ГЛ в СТ ГСК и в связанной системе координат (ССК) антенны, задаваемые управляющим алгоритм режима – от СЦВС;

– параметры суммарной ДН (по направлениям, ширине ГЛ и БЛ) при заданной ориентации ГЛ в ССК антенны.

Упрощенная структура информационного взаимодействия компонент РЛС, СМН и НК в рамках рассматриваемой задачи показана на рис. 1.

Характерный вид ДН АФАР по углу места (при условии, что ССК антенны совпадает с ССК ЛА, строительная ось которой направлена на

Север, а другие оси составляют правый трехгранник и совпадают с горизонтальными осями СТ ГСК) показан на рис. 2; 3 соответственно, при отсутствии отклонения оси ГЛ (направления максимума) от нормали к антенному полотну и при отклонении оси ГЛ вверх на 6° , при котором «нижняя» кромка (направление минимума) имеет околонулевой положительный угол места.

При этом мешающие отражения от земли формируются только по тем БЛ, которые расположены слева от главного луча на рис. 3. ДН по азимутальному углу имеют аналогичный вид.

Таким образом, поиск/обнаружение целей при отсутствии предположений об их скоростях, осуществляется пошагово, по множеству

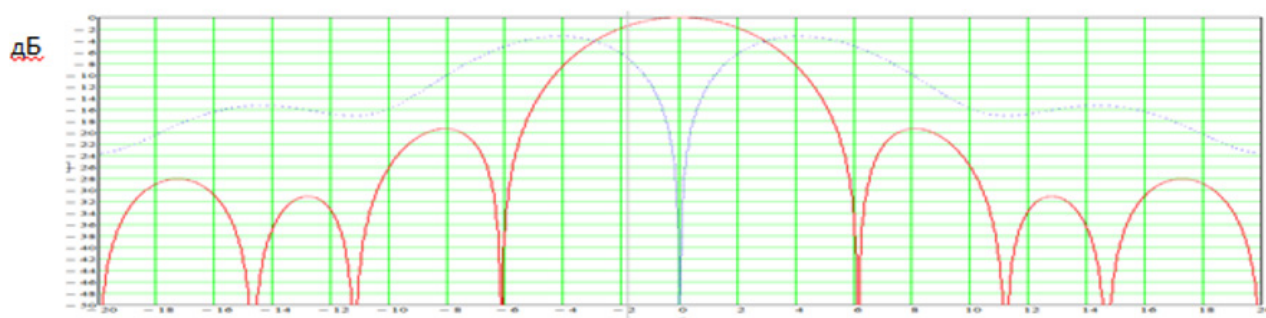


Рис. 2. ДН по углу места (без отклонений ГЛ от нормали антенного полотна)

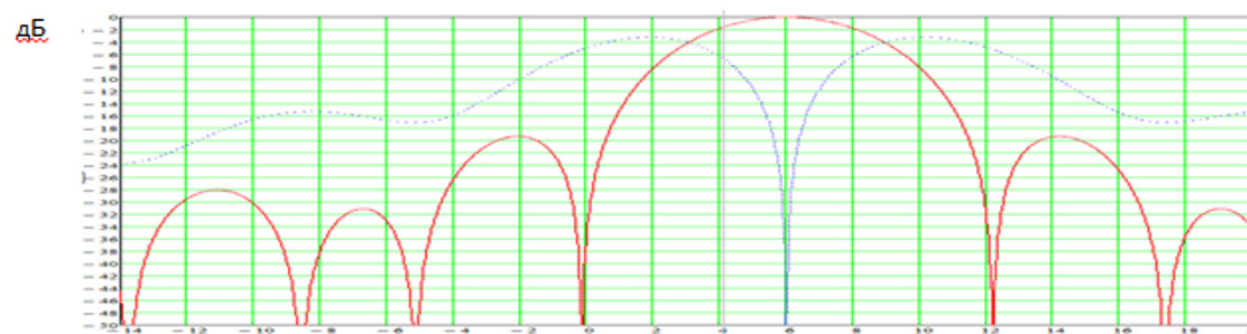


Рис. 3. ДН по углу места (при отклонении ГЛ от нормали антенного полотна)

задаваемых направлений ГЛ в заданной зоне обзора. Если ограничить класс обнаруживаемых ВЦ, например, известными типами самолетов вертолетов, то единственной доступной априорно информацией может быть только широкий диапазон от минимальной скорости до максимальной скорости, характеризующий весь рассматриваемый класс ЛА. В такой ситуации для обнаружения ВЦ по каждому направлению возникает необходимость в последовательной реализации различных режимов излучения/обработки сигналов. Традиционно, при высокой скорости сближения (на встречнопересекающихся курсах) используется режим высокой (ВЧПИ) частоты повторения импульсов (ЧПИ) [6]. Для скоростей на «догонных» курсах, как правило, реализуется режим средней ЧПИ (СЧПИ) [6, 7]. Для зависшего объекта (например, вертолета) используются режимы с обнаружением ВЦ по доплеровским составляющим спектра, обусловленным вращением элементов конструкции ВЦ и находящимся вне спектральной зоны пассивных помех [8]. Очевидно, что последовательное переключение различных режимов в каждом направлении обостряет традиционную проблему [1, 2] оперативности поиска, обнаружения и захвата ВЦ и снижает пропускную способность РЛС, в целом. При этом гарантированная локация цели, «произвольной по скорости», затруднена. В 4 режимах ВЧПИ и СЧПИ сохраняются «слепые» скорости вследствие режекции мешающих отражений. «Нефюзеляжные» составляющие доплеровского сигнала ВЦ в свободной зоне спектра могут отсутствовать или не превышают порога обнаружения даже при длитель-

ном когерентном накоплении. Максимальная дальность обнаружения цели в указанных режимах также существенно отличается.

Смещения и деформации спектра мешающих отражений при ЛЧМ-излучении

На данный момент сохраняются требования к авиационным РЛС [1, 2] по повышению дальности, точности, оперативности, помехоустойчивости локации ВЦ. При малых отношениях сигнал/шум требованиям по дальности обнаружения в наибольшей степени соответствует режим ВЧПИ, в основном, рассматриваемый в данной работе. Ранее были разработаны [9, 10] нетрадиционные методы обнаружения/измерения траекторных параметров малоскоростных ВЦ, в том числе и зависших, основанные на излучении с ВЧПИ при ЛЧМ с инвертируемой (по знаку) и варьiruемой (по модулю) крутизной ЛЧМ. Однако потенциальные возможности их использования применительно и к высокоскоростным ВЦ детально не исследовались и количественно не оценивались. Также не проводился анализ спектра мешающих отражений от земли (МО) при ЛЧМ, который (в сравнении со спектром МО при немодулированной пачке импульсов) претерпевает значительные изменения (смещение и деформация) в зависимости от крутизны ЛЧМ, направлений и дальности до участков земли, формирующих мешающие отражения по БЛ, а также траекторных параметров ФЦ антенны. Границы спектра МО, в общем случае, динамичны и в значительной мере определяют

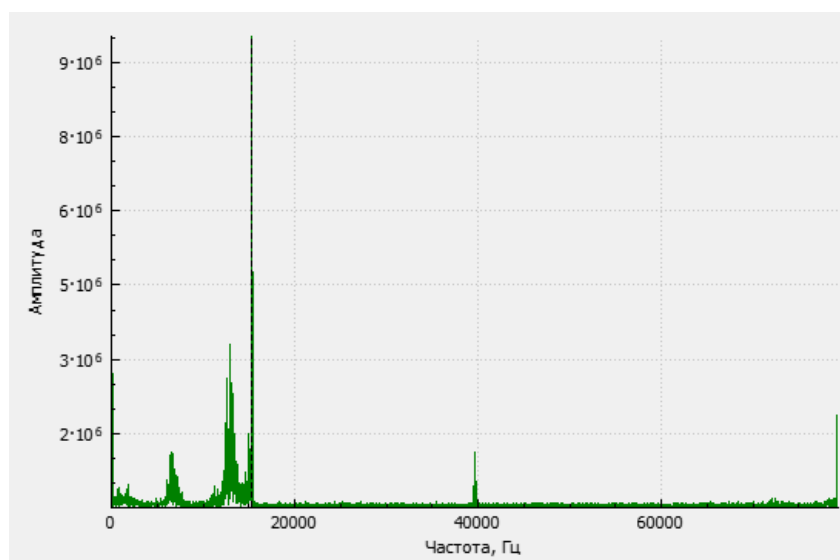


Рис. 4. Спектр эхо-сигнала МО и ВЦ при пачке импульсов без ЛЧМ

ограничения по минимальной дальности и рабочего диапазоне частот гарантированного обнаружения для рассматриваемых разнотипных ВЦ с произвольной радиальной скоростью. На рис. 4–6 приводятся типичные виды спектров эхо-сигналов при ВЧПИ, соответственно, при быстром преобразовании Фурье (БПФ) по пачке импульсов без ЛЧМ, с отрицательной и положительной крутизной ЛЧМ.

На рис. 4 в левой части спектра представлены МО от земли, находящиеся в диапазоне частот от 0 до расчетного значения границы режекции, традиционно [6] принимаемой как $2V/\lambda$, где V – скорость ФЦ, определенная по данным СМН; λ –

длина волны. В центре (около частоты 40 кГц) – доплеровский сигнал обнаруженной высокоскоростной цели. На рис. 4–6 граница режекции обозначена вертикальной пунктирной линией. Рис. 5, 6 показывают характерные смещения и деформации спектра МО, при которых реальные границы спектра существенно отличаются от расчетных границ для режекции сигнала.

Таким образом, при использовании методов при обнаружении с использованием квазинепрерывного ЛЧМ-излучения: с одной стороны, возникает практическая необходимость в адаптивных процедурах, определяющих текущие границы рабочих зон обработки сигнала, свобод-

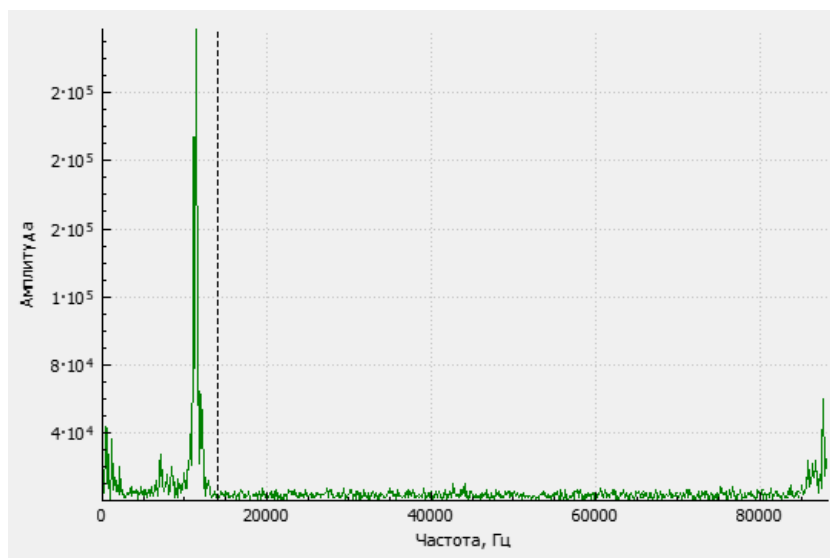


Рис. 5. Спектр эхо-сигнала МО при пачке импульсов с отрицательной крутизной ЛЧМ

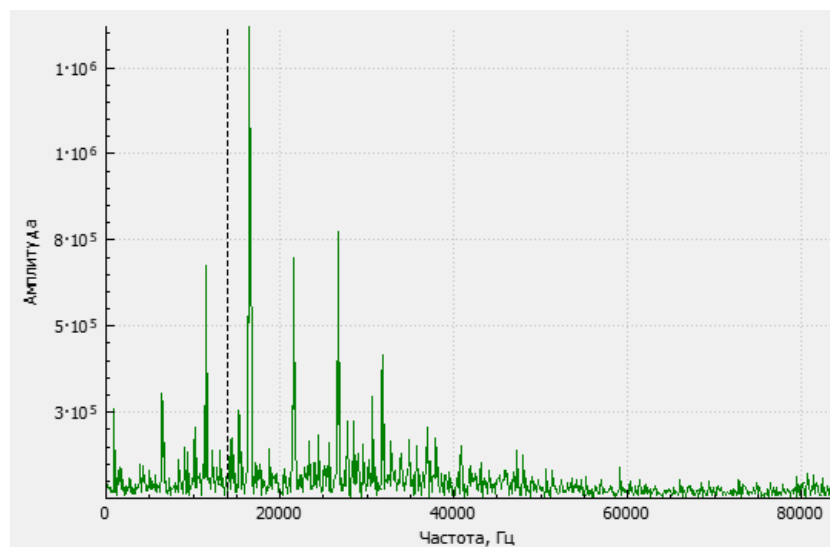


Рис. 6. Спектр эхо-сигнала МО при пачке импульсов с положительной крутизной ЛЧМ

ных от МО; с другой стороны, в интегрированных радиолокационно-навигационных каналах существует информационный и вычислительно-интерфейсный ресурс (с достаточной точностью измерений при МН ДН радара), обеспечивающий реализации таких процедур перед излучением каждой пачки импульсов с ЛЧМ.

Адаптивное определение границ рабочей зоны по частоте при ЛЧМ-излучении

Перед началом излучения в рамках поставленной задачи (см. п. 1) в указанной информационной структуре (рис. 1) и известных параметрах ДН (рис. 2; 3) в СЦВС могут быть реализованы следующие алгоритмические модули:

1. Управляющим алгоритмом режима поиска/обнаружения задаются углы ориентации направления ГЛ в антенной ССК. Для известной ДН в этой же ССК могут быть определены: параметры, характеризующие ширину ГЛ в двух плоскостях; углы для ориентации направлений максимумов ГЛ и всех БЛ, а также параметры, характеризующие их угловую ширину.

2. Углы ориентации всех направлений БЛ в ССК антенны пересчитываются в углы их ориентации относительно осей сопровождающего трехгранника ГСК СТ с учетом текущих значений угла рысканья, крена и тангажа, измеряемых СМН. Из всех направлений далее в рассмотрение берутся только те БЛ, которые ориентированы вниз (т. е. БЛ с отрицательным углом места).

3. На основе скоростных измерений СМН и параметров ориентации направлений БЛ в СТ ГСК определяются радиальные составляющие скорости ФЦ по всем рассматриваемым направлениям БЛ. С использованием измерений геометрической высоты и углов места по каждому направлению БЛ определяются наклонные дальности от ФЦ антенны до предполагаемой точки пересечения с земной поверхностью (считаемой априорно плоской). Определяются максимальная дальность из всех направлений, для которых радиальная скорость неотрицательна, максимальная дальность из направлений, для которых радиальная скорость отрицательна, а также соответствующие горизонтальные дальности.

4. Используя текущие геодезические координаты (от СМН) и расчетные горизонтальные дальности, определяются геодезические координаты пересечения осей рассматриваемых БЛ с поверхностью. Для полученных координат с использованием информации от цифровой

карты местности из ГИС определяются высоты над эллипсоидом для участков поверхности, облучаемых данными БЛ. Затем осуществляется корректировка соответствующих наклонных дальностей.

В результате выполнения п. 1–4 для БЛ, имеющих наименьшее отклонение и соответственно, наибольшую наклонную дальность до земли при положительной и отрицательной радиальной скорости по направлению БЛ, после коррекции с учетом ширины БЛ и известной длины волны определяются значения:

$F_{д\text{ БЛ max}(+)}$ и $R_{\text{БЛ max}(+)}$ – максимальная доплеровская частота, формируемая БЛ на облучаемом участке БЛ при положительных скоростях сближения, и максимальная дальность до границы этого участка соответственно;

$F_{д\text{ БЛ max}(-)}$ и $R_{\text{БЛ max}(-)}$ – максимальная доплеровская частота, формируемая БЛ на облучаемом участке БЛ при отрицательных скоростях сближения, и максимальная дальность до границы этого участка соответственно.

Следует отметить, что частота $F_{дн} = F_{д\text{ БЛ max}(+)}$, по сути, определяет нижнюю границу рабочей зоны по частоте при пачке без ЛЧМ, а верхнюю границу определяет значение

$$F_{дв} = F_{д\text{ БЛ max}(-)} = F_{п} - (2/\lambda) |V_{R\delta\lambda}|,$$

где $F_{п}$ – частота повторения импульсов; $V_{R\delta\lambda}$ – отрицательная радиальная составляющая скорости ФЦ по направлению БЛ.

При ЛЧМ-излучении с крутизной S в общем случае нижняя граница, соответствующая пачке без ЛЧМ, смещается на величину

$$S(2/c)R_{\text{БЛ max}(+)},$$

где c – скорость распространения радиоволны. Таки образом, при ЛЧМ нижняя граница рабочей зоны по частоте $F_{н\text{ ЛЧМ}}$ определяется выражением

$$F_{н\text{ ЛЧМ}} = F_{дн} + S [(2/c) R_{\text{БЛ max}(+)}, \quad (1)$$

т. е. при $S > 0$ – смещение вправо (в сторону увеличения частоты), при $S < 0$ – влево, причем при больших значениях отрицательной крутизны, дальности и при малой $F_{дн}$ соотношение (1) может приводить к значениям $F_{н\text{ ЛЧМ}} < 0$, что соответствует «видимой» частоте $F_{н\text{ ЛЧМ}} := F_{п} + F_{н\text{ ЛЧМ}}$.

Аналогично, верхняя граница $F_{в\text{ ЛЧМ}}$ смещается на величину $S(2/c)R_{\text{БЛ max}(-)}$, т. е.

$$F_{в\text{ ЛЧМ}} = F_{дв} + S [(2/c) R_{\text{БЛ max}(-)}], \quad (2)$$

причем при $F_{в\text{ ЛЧМ}} > F_{п}$, «видимая» частота $F_{в\text{ ЛЧМ}} := F_{в\text{ ЛЧМ}} - F_{п}$.

Ограничения по минимальной дальности обнаружения и диапазонам скоростей

Ограничения по скорости сближения/удаления при положительной крутизне следуют из выражения: $F_{\Pi} > F_{\text{д ВЦ}} + S (2 R_{\text{ВЦ}} / c) > F_{\text{н ЛЧМ}}$, где $F_{\text{д ВЦ}} = 2V_{\text{ВЦ}}/\lambda$ – доплеровская частота сигнала ВЦ, обусловленная скоростью $V_{\text{ВЦ}}$ сближения/удаления; $R_{\text{ВЦ}}$ – дальность до ВЦ. Диапазон скоростей:

$$[F_{\Pi} - S (2 R_{\text{ВЦ}} / c)] > F_{\text{д ВЦ}} > [F_{\text{н ЛЧМ}} - S (2 R_{\text{ВЦ}} / c)]. \quad (3)$$

При этом $F_{\text{н ЛЧМ}}$ при фиксированной ориентации БЛ пропорционально зависит от высоты и скорости носителя, а значение $F_{\text{д ВЦ}}$ включает составляющие, обусловленные радиальными скоростями носителя и ВЦ.

В качестве примера рассматривается типичный случай использования в вертолетном радаре режима ВЧПИ при $F_{\Pi} = 100$ кГц, с крутизной ЛЧМ $S=16$ кГц/мс и длиной волны 3 см. Задана максимальная дальность обнаружения 75 км. Полагается, азимутальный угол оси ГЛ относительно вектора скорости носителя равен 0, угол места 6° , азимутальный угол БЛ с максимальной дальностью 2° , и (-2°) – угол места этого БЛ. Отрицательные радиальные скорости (по отступающим участкам земли) отсутствуют. Носитель движется горизонтально со скоростью 75 м/с при геометрической высоте $H=25$ м. При этом радиальная скорость носителя по направлению оси БЛ составляет 74,9 м/с и соответствует частоте 4993,3 Гц. Дальность до земли для этого БЛ $R_{\text{БЛ max}(+)} \approx 716$ м, что соответствует однозначной задержке сигнала $T_3 = [(2/c)R_{\text{БЛ max}(+)}] \approx 4,77$ мкс. Тогда граничная частота $F_{\text{н ЛЧМ}} = F_{\text{дн}} + S T_3 = 5069,7$ Гц. Полагается, что ВЦ находится по направлению оси ГЛ и скорость сближения/удаления ВЦ и РЛС неизвестна. Составляющая из-за радиальной скорости носителя по оси ГЛ $\approx 74,6$ м/с. Тогда при максимальной дальности обнаружения при заданной крутизне ограничение по максимальной скорости сближения цели будет 1380 м/с.

С учетом скорости носителя, составляющая скорости самой цели будет 1305,4 м/с ≈ 4700 км/ч. При этой же дальности обнаружения смещение частоты, обусловленное ЛЧМ, составляет 8 кГц. Учитывая значение граничной частоты $F_{\text{н ЛЧМ}} \approx 5,07$ кГц видно, что ВЦ будет обнаруживаться при скоростях удаления/сближения в диапазоне $[-43,95$ м/с; 1380 м/с].

Заключение

Интеграция РЛ- и МН- каналов с использованием навигационных данных от НК и ГИС ЛА обеспечивает адаптивное определение границ спектра мешающих отражений по БЛ и их эффективную режекцию при обнаружении ВЦ ранее разработанными методами с использованием квазинепрерывного ЛЧМ-излучения. Показаны подходы к расширению функциональных возможностей таких методов за счет обеспечения их инвариантности для ВЦ с произвольными скоростями, в широком диапазоне скоростей сближения/удаления. Предлагаемый режим ЛЧМ-обнаружения при ВЧПИ в наибольшей мере ориентирован на применение при обнаружении ВЦ в дальней зоне, имеет ограничения по минимальной дальности обнаружения, которые существенно смягчаются при снижении высоты и скорости носителя, вплоть до зависания. Применение режима инвариантного обнаружения ВЦ при зависшем на малой высоте носителе РЛС наиболее эффективно для снижения минимума дальности обнаружения и во многом аналогично применению режима в стационарных и корабельных РЛС.

Библиографический список

1. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1: РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов / под ред. А. И. Канащенкова, В. И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2006. 656 с.
2. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / П. И. Дудник, Г. С. Кондратенков, Б. Г. Татарский, А. Р. Ильчук. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
3. Инерциально-спутниковая система микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / А. В. Чернодаров, А. П. Патрикеев, В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // Новости навигации. 2016. № 4. С. 12–15.
4. Чернодаров А. В., Патрикеев А. П., Коврегин В. Н. др. Летная отработка распределенной системы инерциально-спутниковой микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 01. С. 222–231.
5. Использование инерциально-спутниковой навигационной системы для определения параметров движения фазового центра антенны радиолокатора / А. В. Чернодаров, А. П. Патрикеев, В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // Сборник докл. XXIII Санкт-Петербург. Международ. конф. по интегрированным навигационным системам. 2016. С. 266–274.

6. Справочник по радиолокации. Т. 3 / под ред. М. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. К. Н. Трофимова. М.: Сов. радио, 1979.

7. *Hovantssian S. A.* Medium PRF performance analysis // IEEE Trans. Aerosp. Elcttron. Syst. 1982. Vol. AES-18, № 3. P. 286–296.

8. Доплеровское выделение воздушных целей: патент на изобретение № 43899647 (USA). Зарег. 22.02.1980 г.

9. *Коврегин В. Н., Коврегина Г. М.* Способ обнаружения дальности и скорости низколетящей малоскорост-

ной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения и инвертируемой линейной частотной модуляции: патент на изобретение № 2697509 (RU). Зарег. 15.08.2019 г.

10. *Коврегин В. Н., Коврегина Г. М.* Способ одновременного измерения дальности, скорости и ускорения малоскоростной маневрирующей воздушной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения импульсов и линейной частотной модуляции: патент на изобретение № 2692912 (RU). Зарег. 01.07.2019 г.

УДК 519.715

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-41-43

А. А. Кузнецов*

аспирант

А. В. Небылов*

доктор технических наук, профессор

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОБЗОР ЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОЙ ОШИБКИ УПРАВЛЕНИЯ

Проведен обзор частотных методов оценки максимальной ошибки; поставлена задача исследования применения вейвлет-преобразования для определения максимальной ошибки управления и нахождения наиболее неблагоприятного задающего воздействия.

Ключевые слова: анализ максимальной ошибки управления, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование.

A. A. Kuznetsov*

PhD Student

A. V. Nebylov*

Dr. Sc., Tech., Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

OVERVIEW OF FREQUENCY METHODS FOR ASSESSING THE MAXIMAL ERROR OF CONTROL

A review of methods for estimating the maximum error of automatic control is carried out. The task is stated to study the use of the wavelet transform to determine the maximum control error and to find the most unfavorable disturbance for control.

Keywords: analysis of maximal control error, Fourier transform, wavelet transform.

На настоящий момент в области динамической фильтрации как правило применяются винеровский и калмановский методы статистического синтеза, использующие в своей основе среднеквадратичный критерий точности, при полном спектрально-корреляционном описании воздействий.

В случае синтеза робастных динамических систем и отказе от применения спектральных моделей воздействий и их замена числовыми характеристиками производных, в первую очередь – максимальными значениями производных, создают условия для использования максимальной ошибки при исследовании систем управления. В данном случае максимальная ошибка будет являться наиболее объективной характеристикой точности управления [1].

Максимальная ошибка является детерминированной величиной, полученной при наиболее неблагоприятном входном воздействии на систему. Для нахождения оценки максимальной ошибки достаточно рассмотреть задающее воздействие с ограничением одной производной, прядок которой совпадает с порядком астатизма рассматрива-

емой системы. С увеличением числа ограниченных производных воздействия при анализе максимальной ошибки и получении ее оценки с помощью аналитических методов возникают определенные затруднения, описанные в [1].

Для получения приближенной оценки максимальной ошибки возможно использовать анализ в частотной области путем спектрального представления задающего воздействия и ошибки.

Определим максимальную ошибку управления следующим образом [1]:

$$e_g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{eK}(\tau) g^{(K)}(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где $h_{eK}(t)$ – весовая функция системы управления по K -й производной задающего воздействия.

Так как длительность реализации процесса управления конечна и функции $g^{(K)}(t)$ и $e_g(t)$ ограничены по модулю, то предполагается, что выполняются условия их интегрируемости:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g^{(K)}(t)| dt < \infty, \quad \int_{-\infty}^{\infty} |e_g(t)| dt < \infty. \quad (2)$$

Применив преобразование Фурье [2, 3] к (1), получим:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} e_g(t) e^{-j\omega t} dt &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_{eK}(\tau) g^{(K)}(t-\tau) e^{-j\omega t} d\tau dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h_{eK}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \int_{-\infty}^{\infty} g^{(K)}(t-\tau) e^{-j\omega(t-\tau)} d(t-\tau), \quad (3) \end{aligned}$$

или

$$E_g(j\omega) = H_{eK}(j\omega) G_K(j\omega). \quad (4)$$

Используя обратное преобразование Фурье для получения исходных функций, можно записать следующие выражения:

$$\begin{aligned} \max |e_g(t)| &\leq \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |E_g(j\omega)| d\omega = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |H_{eK}(j\omega) G_K(j\omega)| d\omega, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\max |g^{(K+i)}(t)| \leq \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \omega^i |G_K(j\omega)| d\omega, i = \overline{0, N-K}. \quad (6)$$

Для обращения (6) в равенства в [1] выделяется некоторый класс функций $g^{(K)}(t) \in \Xi$. То есть предполагается, что внутри области определения функции $g^{(K)}(t) \in \Xi$ имеется некоторый момент времени t , при котором гармонические составляющие функции $g^{(K)}(t)$ имеют фазу, кратную 2π , т. е. момент времени, при котором $g^{(K)}(t)$ достигает максимального значения.

В [1] для спектрального разложения воздействия используется преобразование Фурье, которое может дать только частотную информацию, содержащуюся в сигнале, что в общем случае ограничивает класс рассматриваемых сигналов стационарными [2].

Для расширения класса рассматриваемых сигналов предлагается исследовать возможность использования вейвлет-преобразований, позволяющих обеспечить частотно-временное представление как стационарных, так и нестационарных сигналов [2, 4].

В качестве альтернативы преобразованию Фурье рассматривается непрерывное вейвлет-преобразование. Выражения для прямого и обратного преобразования описываются следующими выражениями:

$$W(a, b) = (S(t), \psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (7)$$

$$S(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(a, b) \psi_{ab}(t) \frac{da db}{a^2}, \quad (8)$$

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (9)$$

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty, \quad (10)$$

где $S(t)$ – произвольный конечный сигнал; a – изменение масштаба; b – отсчет; $\psi(t)$ – материнский вейвлет; C_{ψ} – нормирующий коэффициент; $\Psi(\omega)$ – преобразование Фурье вейвлета $\psi(t)$.

Поскольку вейвлет-преобразование позволяет провести частотно-временной анализ сигналов, то предполагается, что данное преобразование позволит отыскать некоторый момент времени t , при котором $g^{(K)}(t)$ достигнет максимального значения, то есть найти наиболее неблагоприятное воздействие, обеспечивающее максимальное значение ошибки управления $e_g(t)$, в том числе для случая ограничения нескольких производных задающего воздействия.

Применение данного преобразования позволит разработать новый эффективный метод исследования максимальной ошибки управления и минимизации этой ошибки в дополнение к развитым ранее и описанным в [1] двум аналитическим методам: аппроксимативному частотному методу (основанному на подборе полиномов, мажорирующих амплитудно-частотную характеристику системы по ошибке) и методу канонических представлений, который в определенном смысле является временным и связан с подбором совокупности гармонических функций, выводящих динамическую ошибку на максимальное возможное значение. Эти функции, дающие «каноническое представление» воздействия, находятся на основании теории обобщенных моментов, развитой А. А. Марковым, учеником П. Л. Чебышевым. При этом в простых случаях можно найти аналитические решения [5], оставляя эффективные методы математического моделирования для более сложных вариантов постановки задачи с ограничением нескольких производных воздействия.

Библиографический список

1. Небылов А. В. Гарантирование точности управления. М.: Наука: Физматлит, 1998. 304 с.

2. *Блаттер К.* Вейвлет-анализ: основы теории / пер. с нем. Т. Э. Кренкеля под ред. А. Г. Кюркчана. М.: Техносфера, 2004. 280 с.

3. *Иванов Ю. П., Никитин Ю. П.* Информационно-статистическая теория измерений. Методы оптимального синтеза информационно-измерительных систем, критерии оптимизации и свойства оценок. СПб.: ГУАП, 2011. 104 с.

4. *Яковлев А. Н.* Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 104 с.

5. *Небылов А. В.* Обобщение одного неравенства, выведенного Гауссом для одновершинных распределений // Матем. заметки. 1986. Т. 40, № 3. С. 423–425.

УДК 004.85

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-44-47

Р. Н. Малаханов*

кандидат технических наук, доцент

В. С. Чижов*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В КЛАССИФИКАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НИЗКОГО КАЧЕСТВА

Предлагается решение проблемы классификации спутниковых изображений низкого качества, содержащих летательные аппараты, путем применения сверточных нейронных сетей. Был проведен сравнительный анализ популярных архитектур сверточных нейронных сетей для решения задачи с достаточной точностью, а также описан процесс подготовки выбранного алгоритма на всех этапах: подготовка тестовых данных, обучение нейронной сети и обработка результатов.

Ключевые слова: глубокое обучение, искусственные нейронные сети, классификация изображений.

R. N. Malakhanov*

PhD, Tech., Associate Professor

V. S. Chizhov*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN CLASSIFICATION OF LOW-QUALITY SATELLITE IMAGERY

The article offers a solution to the problem of classification of low-quality images of aircraft using convolutional neural networks. To solve this problem with sufficient accuracy, an analysis of popular architectural neural networks was performed, and the process of preparing the selected algorithm at all stages was described: preprocessing test data, training the neural network, and processing the results obtained.

Keywords: deep learning, artificial neural networks, image classification.

Введение

Исторически ручной анализ спутниковых и воздушных изображений был возможен во многом благодаря малому количеству таких изображений, что уже не является проблемой в наше время. Появилась новая проблема, заключающаяся в необходимости ручного анализа больших объемов данных. Также следует учитывать, что большая часть изображений высокого качества является коммерческой. Публично доступные наборы изображений, зачастую, имеют крайне низкое качество, что сильно усложняет задачу анализа. Для извлечения полезной информации из подобных снимков, зачастую, сначала необходимо провести их классификацию, когда изображения маркируются, исходя из того, что на них изображено. Эта информация в дальнейшем может использоваться в широком круге задач в том числе и в области авиации, например для составления подробных цифровых карт местности, админи-

стрирования или мониторинга местности аэропорта [1].

Развитие технологий в области компьютерного зрения позволяет нам автоматизировать анализ больших объемов данных применением различных методов искусственного интеллекта. Особенно хорошо с данной задачей справляются с применением методов машинного обучения, одним из которых являются глубокие сверточные сети. Их использование позволяет значительно сократить трудозатраты на решение данной задачи.

Учитывая все это, главной задачей этой работы становится сравнительный анализ популярных архитектур сверточных нейронных сетей на примере публичного набора данных спутниковых фотоснимков отдельных летательных аппаратов (ЛА) и местности, имеющих низкое разрешение, а также их экспериментальная оценка.

В качестве исходных изображений были взяты реальные данные Planesnet, от Kaggle [2].



Рис. 1. Примеры исходных изображений с маркировками

Для решения задачи использовался язык программирования Python в связке с популярными модулями для работы с нейронными сетями Keras. Обучение нейронных сетей также проводилось на онлайн-платформе Kaggle.

Анализ и обработка исходных данных

В качестве исходных данных представлены два набора изображений. Один из них является тренировочным (train), который используется для обучения нейронной сети. Вторым является тестовым (test), на основании которого будет проводиться оценка точности обученной нейронной сети. Всего в наборе данных «Planesnet» находится 32000 изображений с заранее подготовленной маркировкой: 1 – для изображения с ЛА, 0 – для изображения без ЛА [2].

Всего мы имеем дело с 24000 изображениями с маркером «0» (без ЛА) и 8000 изображениями с маркером «1» (с ЛА). Как видно, классы являются сильно несбалансированными. Треть изображений без ЛА содержит в себе различные природные ландшафты: воду, каменистую поверхность, почву и т. д. Другая треть содержит отдельные части ЛА, которых, однако, недостаточно, чтобы попасть в категорию «1». Последняя треть этих изображений содержит яркие объекты с выраженной формой, которые ранее были ошибочно приняты за летательный аппарат. Изображения категории «1», в основном, отцентрированы на фюзеляж ЛА и включают в себя крылья, хвостовую и носовую части самолета. Присутствуют изображения ЛА различных размеров, смотрящих в различном направлении.

Разрешение всех изображений 20×20. Все изображения поставляются в трех каналах: красном (R), зеленом (G) и синем (B). Примеры исходных изображений с маркировками приведены на рис. 1.

Кроме того, чтобы подготовить данные для нейронной сети, необходимо для начала нормализовать их. Это делается для того, чтобы облегчить работу нейронной сети и, соответственно, сократить время нахождения решения.

Самый простой способ нормализовать, работая с массивами NumPy 20×20, в которые заранее были распределены тестовая и обучающая выборки, это разделить их на 255, так как входные данные каждого конкретного значения пикселя нормализуются в диапазон от 0 до 1. Это происходит по формуле:

$$f(p, \min, \max) = \frac{p - \min}{\max - \min}, \quad (1)$$

где f – функция нормализации; p – значение конкретного цвета пикселя; \min – минимальное значение пикселя – 0; \max – максимальное значение пикселя – 255.

Также все изображения проходили аугментацию в реальном времени во время обучения каждой модели посредством поворота на 90° в обе стороны, а также на случайные углы до 25°.

Описание архитектур сравниваемых сверточных нейронных сетей

В данной работе будут рассматриваться следующие архитектуры сверточных нейронных сетей:

1) VGG16 [3] – отличительной идеей данной архитектуры является сохранение фильтров как можно более простыми, поэтому все операции свертки выполняются фильтрами размерами 3×3 и с шагом 1, все операции подвыборки – фильтром размером 2×2 и с шагом 2. Имеет глубину в 16 слоев;

2) AlexNet [4] – архитектура с общей глубиной 8 слоев, 5 из которых являются сверточными, а 3 – полносвязными;

3) VGG19 [3] – данная архитектура является более глубокой, чем VGG16, и имеет, соответственно, 19 слоев;

4) ResNet34 [5] – особенностью данной архитектуры является решение проблемы исчезающего градиента посредством передачи данных в обход преобразующих слоев, после чего они прибавляются к результату, что не усложняет структуру и, тем самым, не увеличивает время обучения;

Результаты сравнительного анализа различных архитектур

Архитектура	0	1	Среднее	Точность	Полнота	Время обучения, мин
VGG16	98,68	95,13	96,905	96,47	97,9	39
AlexNet	99,1	96,74	97,92	97,06	98,1	31
VGG19	99,12	96,54	97,83	97,36	98,02	218
ResNet34	99,57	96,29	98,43	97,48	99,47	154
DenseNet121	99,34	97,11	98,225	97,61	99,46	59

5) DenseNet121 [6] – в основе данной архитектуры лежит предположение, что укороченное соединение в сверточных нейронных сетях позволит обучать более глубокие и точные модели. Был создан компактно-соединенный (dense) блок, соединяющий каждый слой с каждым другим слоем. Важным отличием от ResNet является то, что признаки не суммируются, а объединяются (concatenate) в единый канал.

Перед началом обучения каждой модели были заданы следующие параметры:

1) learning rate = 0,01;

2) decay = 0,00005;

3) momentum = 0,9;

4) epochs = 10;

5) в качестве оптимизатора был выбран алгоритм стохастической оптимизации Adam – adaptive moment estimation [7];

6) размер батча = 128;

7) размер обучающей выборки – 25 000 изображений;

8) размер тестовой выборки – 8000 изображений.

В данной работе функцией потерей была выбрана кросс-энтропия, которая часто используется в задачах классификации, детектирования и сегментации изображений. Выходным сигналом кросс-энтропии является значение вероятности в диапазоне от 0 до 1. Значение функции потерь увеличивается при отклонении прогнозируемой вероятности от целевой маркировки [1]. Когда количество классов равно двум, кросс-энтропия может быть вычислена по формуле

$$CE(p, y) = -(y \ln p + (1 - y) \ln(1 - p)), \quad (2)$$

где $y = 0$ для объекта первого класса и $y = 1$ для второго; p – вероятность принадлежности объекта ко второму классу.

Результаты анализа и экспериментов

Сравнение архитектур проводилось по F1-мере по каждому классу изображений (0 – для изображений без ЛА, 1 – для изображений с ЛА), а также по ее среднему значению по обоим классам, по точности классификации и полноте выборки, а также по времени, которое за-

няло обучение каждой архитектуры. Результаты анализа приведены в таблице.

Формулы для получения значений точности (Precision) и полноты (Recall) имеют вид:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (3)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (4)$$

где TP – истинно-положительное решение; TN – истинно-отрицательное решение; FP – ложно-положительное решение, FN – ложно-отрицательное решение.

Также стоит отметить, что время обучения можно снизить, понизив количество обучаемых слоев, что, в свою очередь, отрицательно скажется на точности, так как понижается количество обучаемых параметров. На рис. 2 приведены примеры работы модели VGG16 с подлинными и предсказанными моделью классами. Как видно из рисунка, модель ошиблась в одном из случаев, приняв его за летательный аппарат.

В результате обучения и тестирования модели был получен график зависимости F1-меры от эпохи в процессе обучения и валидации. С ним можно ознакомиться на рис. 3.

Как видно из рис. 3, мы получаем довольно высокую точность используя любую из архитектур, но наилучшие результаты дает более современная DenseNet121, даже учитывая низкое разрешение исходных данных, что говорит о высоком потенциале использования машинного обучения в задачах обработки спутниковых изображений и компьютерного зрения. Колебания в значениях F1-меры устраняются с увеличением эпох, что увеличивает и время обучения. Столь высокое значение F1-меры объясняется малым количеством классов. Основной проблемой, которая понижает значение F1-меры на классе «1», является несбалансированность классов. Также следует учитывать сложность реализации архитектур: AlexNet, ResNet34 и DenseNet121 по сравнению с VGG16 и VGG19 являются более сложными в реализации.

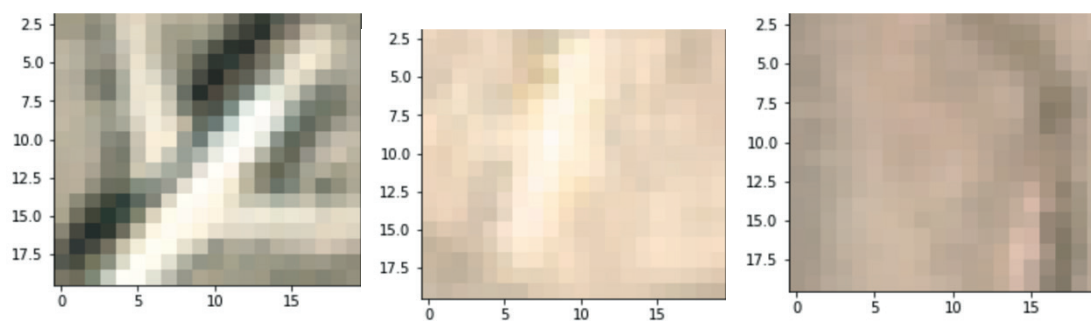


Рис. 2. Примеры работы модели VGG16

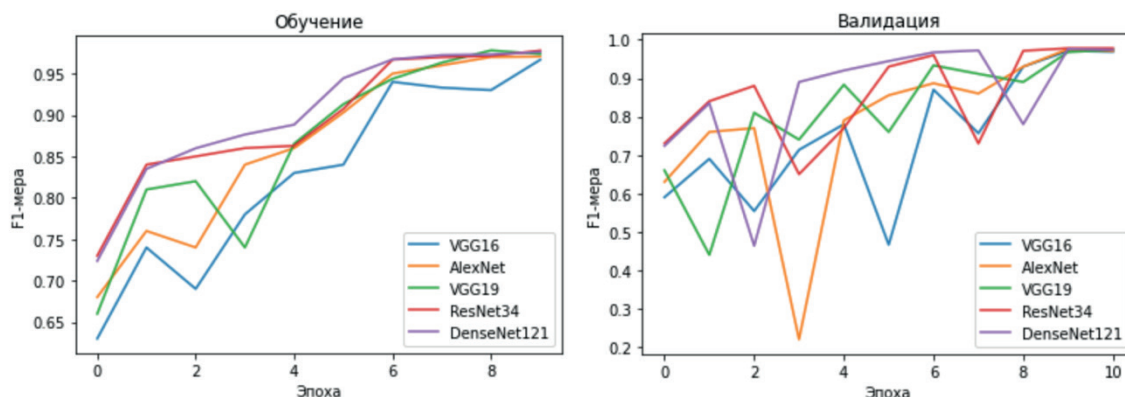


Рис. 3. Зависимость F1-меры от эпохи обучения для различных моделей при обучении и валидации

Заключение

В данной работе было предложено решение проблемы классификации публично доступных низкокачественных спутниковых изображений летательных аппаратов с помощью сверточных нейронных сетей. Сравнительный анализ точности показал, что все модели демонстрируют высокую точность в решении данной задачи по критерию F1-меры. Однако по времени

обучения VGG19 и ResNet34 занимают значительно больше времени, чем другие архитектуры, что невыгодно выделяет их на фоне остальных. Оптимальной по критерию F1-меры, точности и времени обучения является архитектура DenseNet121, однако следует учитывать, что эта архитектура все же была разработана для работы с изображениями с более высоким разрешением и является более сложной в реализации, нежели архитектуры VGG.

Библиографический список

1. Семантическая сегментация спутниковых снимков аэропортов с помощью сверточных нейронных сетей / В. А. Горбачёв, И. А. Криворотов, А. О. Маркелов, Е. В. Котлярова // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 4. С. 636–645.
2. Planes in satellite imagery. URL: <https://www.kaggle.com/rharmell/planesnet> (дата обращения: 14.11.2020).
3. Simonyan K. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. URL: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf> (дата обращения: 14.11.2020).
4. Krizhevsky A. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. URL: <https://papers.nips.cc/paper/2012/file/c399862d3b9d6b-76c8436e924a68c45b-Paper.pdf> (дата обращения: 15.11.2020).

papers.nips.cc/paper/2012/file/c399862d3b9d6b-76c8436e924a68c45b-Paper.pdf (дата обращения: 15.11.2020).

5. Kaiming H. Deep Residual Learning for Image Recognition. URL: <https://arxiv.org/pdf/1512.03385.pdf> (дата обращения: 15.11.2020).

6. Huang G. Densely Connected Convolutional Networks. URL: <https://arxiv.org/pdf/1608.06993.pdf> (дата обращения: 16.11.2020).

7. Kingma D. P. Adam: A Method for Stochastic Optimization. URL: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf> (дата обращения: 16.11.2020).

УДК 004.934

Р. Н. Малаханов*

кандидат технических наук, доцент

В. Д. Шимков*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ГОЛОСОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВИАЦИОННЫМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ИНДИКАТОРОМ

Разработано программное обеспечение для голосового управления авиационным многофункциональным индикатором. Производится преобразование речи в текст с последующим его анализом и переключением между элементами индикатора. Приведены результаты работы программы.

Ключевые слова: голосовое управление, авиационный индикатор, речь в текст.

R. N. Malahanov*

PhD, Tech., Associate Professor

V. D. Shimkov*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

VOICE CONTROL OF THE AVIATION MULTI-FUNCTION INDICATOR

Software for voice control of the aviation multifunctional indicator has been developed. Speech-to-text conversion is performed, followed by its analysis and switching between indicator elements. The results of the program are presented.

Keywords: voice control, aircraft indicator, speech-to-text.

Голосовое управление это один из способов взаимодействия с устройством. Оно предназначено для ввода некоторых управляющих команд. Примерами таких команд в данной работе будут: «включить авиагоризонт», «открыть карту» и т. п. Такая система поможет летчику не отвлекаться на переключение элементов многофункционального индикатора вручную.

Задачу можно разделить на три подзадачи, а именно:

- распознавание и преобразование речи в текст;
- анализ полученного текста;
- выполнение задач на основе полученной информации.

Первую и основную задачу распознавания и преобразования речи в текст можно решить с использованием системы CMU Sphinx. Данная система довольно проста в настройке и развертывании, имеет в себе довольно сильную математическую модель, а также, что крайне важно в поставленной задаче, она может работать на большинстве устройств [1].

Структурная система приведена на рис. 1 и состоит из двух основных блоков: акустико-фонетический блок и лингвистический блок.

На вход акустико-фонетического блока поступает некоторый звуковой сигнал. Сигнал разбивается на части в зависимости от выставленной частоты дискретизации, и далее происходит спектральный анализ данного сигнала. Применяя мел-шкалу и треугольные фильтры сглаживаем спектр сигнала [2]. Полученный результат показан на рис. 2. Из полученного спектра выделяются фонемы и квазифонемы с использованием скрытых марковских моделей. Фонема – минимальная единица устной речи. Из фонем строятся распознанные слова. Квазифонемы являются различными шумами, например, гулом двигателей, а также паузами. Для них также строятся специальные модели, с помощью которых квазифонемы отделяются от обычных фонем. Использование этих моделей позволяет существенно повысить точность распознавания.

Также необходимо создать словарь транскрипций. В этом словаре записаны все слова, которые используются в нашей системе и для каждого слова записана транскрипция – последовательность фонем, которые его образуют. Словарь транскрипций является переходным элементом между акустико-фонетическим и лингвистическим блоками.

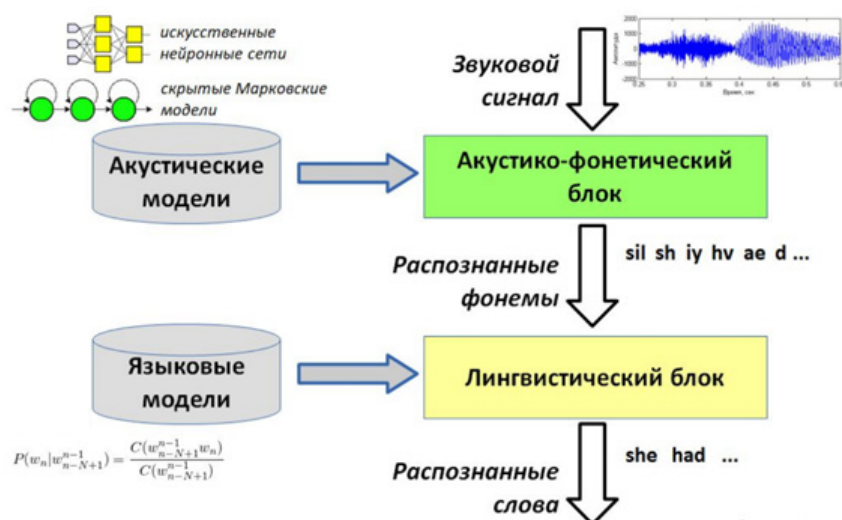


Рис. 1. Структурная схема системы распознавания речи

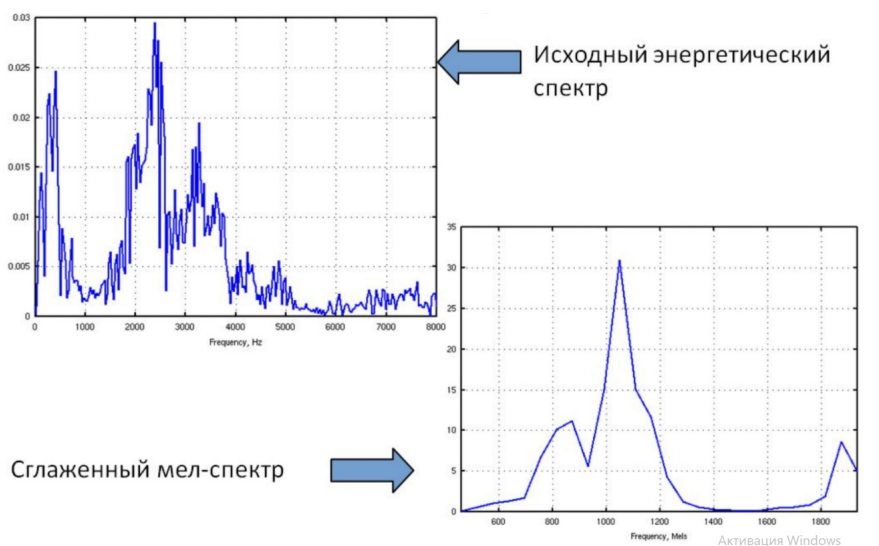


Рис. 2. Исходный и сглаженный спектры звукового сигнала

Пример слова из используемого словаря:

авиагоризонт a v v i a y g a y r r i z o o n t

В словаре могут присутствовать различные транскрипции одного и того же слова. Это обуславливается тем, что в разном контексте, или же в связи с индивидуальным произношением летчика, одно и то же слово может иметь различающийся набор фонем. Использование нескольких транскрипций повышает точность системы и делает систему более дикторнезависимой [1].

Пример такого слова:

основная a s n o o v n a y i;

основная a s n a v n a a i.

Лингвистический модуль отвечает за то, как будут построены слова и фразы, полученные

в результате анализа. Для работы он использует специальные языковые модели. Языковые модели описывают вероятности слов в фразе, а также их комбинаций. Таким образом увеличивается правдоподобность распознанного текста. Языковые модели бывают двух видов: детерминированные и вероятностные. Вероятностные модели построены на N -граммах и моделируют язык исходя из вероятностей возникновения следующих слов. В детерминированных моделях последовательности слов в полученном тексте нам заранее известны. Для них пишутся специальные файлы, содержащие формальные правила, описывающие построения предложений. В работе используется именно детерминированная языковая модель. Такая модель

```
#JSGF V1.0;

grammar mfi;
public <query> = <greeting> <expression>;

<greeting> = (компьютер|система);
<n1> = (авиа|авиагоризонт|горизонт|карта);
<n2> = (окно|панель);
<n3> = (главная|начальная|основная) [<n2>];
<number> = <n3>|<n2>|<n1>;
<operation> = включи | включить | открой | открыть | покажи | показать | выведи | вывести | запусти | запустить;
<expression> = <operation> <number> | <number>;
```

Рис. 3. Файл с грамматикой, используемый в системе

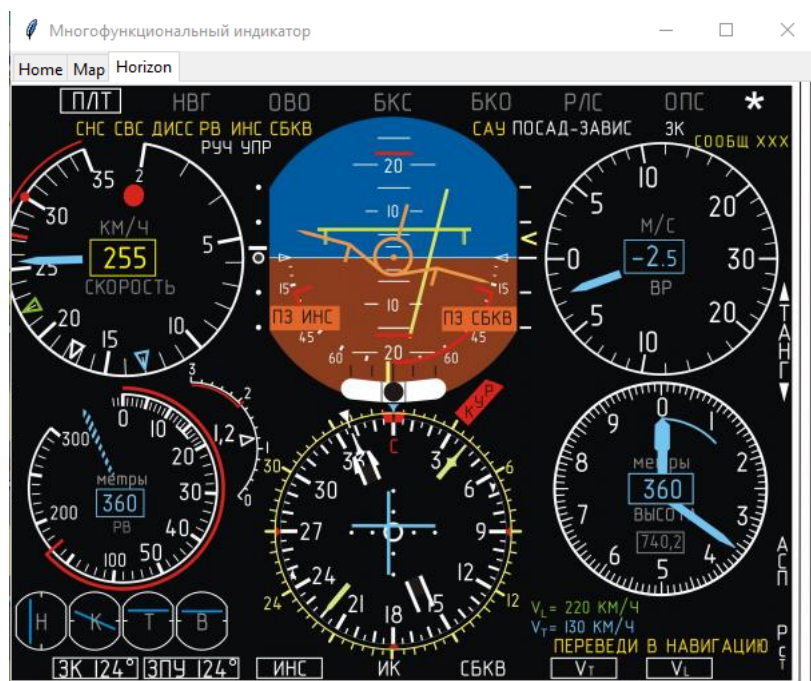


Рис. 4. Созданный индикатор

намного лучше подходит для голосового управления, так как является гораздо более быстрой, и робастной [1]. Недостатком ее является то, что слова необходимо называть довольно четко. Описывающий грамматическую модель файл, используемый в разрабатываемой системе, показан на рис. 3.

Примеры фраз для работы с разработанной системой: «Компьютер, открой карту», «Система, покажи авиагоризонт».

Полученная после распознавания текстовая строка анализируется программой, и, в данной ее версии, происходит переключение между интерфейсами созданного упрощенного индикатора, в который входят начальное окно, карта и авиагоризонт [3]. Индикатор продемонстрирован на рис. 4. Также были сохранены кнопки

переключения, в случае возможного выхода из строя микрофона в кабине самолета.

Предложенная система позволяет с хорошей точностью и высокой скоростью управлять авиационным многофункциональным индикатором.

Библиографический список

1. Распознавание речи: как сделать Speech-to-Text своими руками. URL: <https://www.highload.ru/siberia/2018/abstracts/3585> (дата обращения: 29.11.2020).
2. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 604. с
3. Харин В. И. Авиационные приборы: учеб. пособие для сред. спец. учеб. завед граждан. авиации. М.: Транспорт, 1978. 205 с.

УДК 629.7.05; 51-74

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-51-55

Л. С. Мамедова*

магистрант

А. В. Небылов*

доктор технических наук, профессор

А. И. Панферов*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВСТРЕЧИ

Для обеспечения встречи с высокой вероятностью исследуется влияние возмущений на движение автоматического летательного аппарата с помощью систем дифференциальных уравнений. Предлагается формирование математической модели с учетом внешних возмущений с целью нахождения коэффициентов. Коэффициенты передаточных функций, полученные в ходе исследования, необходимы для корректной работы системы обеспечения встречи. Продемонстрированы результаты исследования.

Ключевые слова: автоматический летательный аппарат, обеспечение встречи, математическая модель, передаточная функция, внешние возмущения, моделирование.

L. S. Mamedova*

Postgraduate Student

A. V. Nebylov*

Dr. Sc., Tech., Professor

A. I. Panferov*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

CONVERSION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF AN AUTOMATIC AIRCRAFT IN THE SYSTEM OF ENSURING THE MEETING

The article examines the influence of disturbances on the movement of an automatic aircraft to ensure a high-probability encounter using systems of differential equations. It is proposed to form transfer functions taking into account external perturbations in order to find coefficients. The coefficients obtained during the calculation of transfer functions are necessary for the correct operation of the system for ensuring the meeting of an automatic aircraft. The results of the study are demonstrated.

Keywords: automatic aircraft, meeting, mathematic model, transfer function, external disturbances, simulation.

Для обеспечения встречи [1] двух автоматических летательных аппаратов (АЛА) необходимо учитывать внешнее воздействие, которое может являться резким порывом ветра, либо вхождение АЛА в зону турбулентности.

Математическая модель АЛА практически не отличается от математической модели пилотируемого воздушного судна. Преимуществом в случае автоматического летательного аппарата является интеллектуализация системы управления с помощью математической модели, которая позволяет аппарату самостоятельно определять основные параметры, в том числе характер возмущений и на основании проведенного анализа формировать траекторию полета. Это важный момент для обеспечения встречи двух АЛА, так как сильные порывы ветра

должны быть отслежены, чтобы аппарат не отклонился от курса и не был поврежден в результате взаимодействия с возмущающей средой.

В работе исследуется влияние возмущений на АЛА самолетной схемы, так как самолетная схема является наиболее распространенной при проектировании АЛА.

Характеристики возмущений зависят от многих факторов, таких как время года, погодные условия, атмосферное давление, время суток, рельеф местности, высота полета и др. Учитывать влияние возмущений можно приблизительно. Как правило, поправки к законам управления делаются на порывы ветра.

Ветер, как правило, раскладывают на вертикальную и горизонтальную составляющие, причем первая оказывает наибольшее влияние [2].

Рассматривается система дифференциальных уравнений для горизонтального возмущения (1):

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = -l_1 V - l_2 \alpha - l_4 \theta - l_1 w_x \\ \frac{d\theta}{dt} = a_4 \alpha + a_6 \theta + a_7 V + a_7 w_x \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \omega_z \\ \frac{d\omega_z}{dt} = -a_1 \omega_z - a_2 \alpha - a_0 V - a_0 w_x \end{cases}, \quad (1)$$

где V – путевая скорость полета; l_2 и a_2 – коэффициенты, характеризующие продольную статическую устойчивость АЛА; l_4 и a_6 – коэффициенты, характеризующие устойчивость АЛА при изменении угла наклона траектории; a_4 – коэффициент, характеризующий способность АЛА менять траекторию движения; a_0 , a_7 и l_1 – коэффициенты, характеризующие устойчивость АЛА по скорости; w_x – горизонтальная скорость возмущения; α – угол атаки (разница между углом тангажа и углом наклона траектории); θ – угол наклона траектории; ϑ – угол тангажа; ω_z – угловая скорость АЛА в продольной плоскости.

Так как $\alpha = \vartheta - \theta$, то система приводится к виду (2):

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = -l_1 V - l_2 (\vartheta - \theta) - l_4 \theta - l_1 w_x \\ \frac{d\theta}{dt} = a_4 (\vartheta - \theta) + a_6 \theta + a_7 V + a_7 w_x \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \omega_z \\ \frac{d\omega_z}{dt} = -a_1 \omega_z - a_2 (\vartheta - \theta) - a_0 V - a_0 w_x \end{cases}. \quad (2)$$

Систему дифференциальных уравнений можно представить в матрично-векторном виде (3):

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (3)$$

где x – вектор состояния объекта; u – вектор внешнего воздействия (в данном случае – возмущение w_x); A и B – матрицы коэффициентов для векторов состояния и внешнего воздействия соответственно.

Вектор состояния описан в виде (4):

$$x = \begin{bmatrix} V \\ \theta \\ \vartheta \\ \omega_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

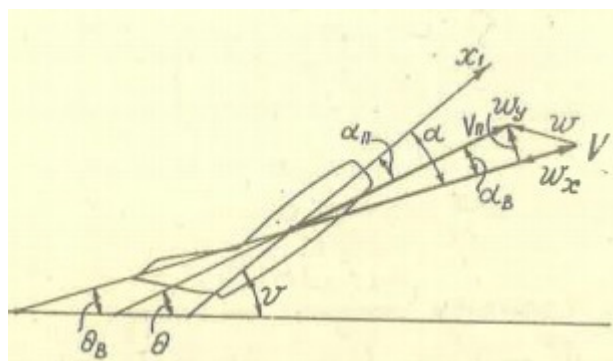


Рис. 1. Влияние вертикального возмущения на АЛА

Тогда матрица A (5):

$$A = \begin{bmatrix} -l_1 & l_2 - l_4 & -l_2 & 0 \\ a_7 & a_6 - a_4 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & a_2 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Матрица B (6):

$$B = \begin{bmatrix} -l_1 \\ a_7 \\ 0 \\ -a_0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Влияние вертикального возмущения на АЛА показано на рис. 1, где α – угол атаки; α_B – дополнительный угол атаки; α_n – путевой угол атаки; θ – угол наклона траектории; θ_B – дополнительный угол наклона траектории; ϑ – угол тангажа; w_x – горизонтальная скорость возмущения; w_y – вертикальная скорость возмущения; w – полная составляющая возмущения; x_1 – продольная ось АЛА; V_n – путевая скорость АЛА; V – воздушная скорость АЛА.

Для вертикальной составляющей возмущения система дифференциальных уравнений имеет вид (7):

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = -l_1 V - l_2 (\alpha_B + \alpha_n) - l_4 \theta - l_3 \delta_B \\ \frac{d\theta}{dt} = a_4 (\alpha_B + \alpha_n) + a_6 \theta + a_7 V \\ \frac{d\vartheta}{dt} = \omega_z \\ \frac{d\omega_z}{dt} = -a_1 \omega_z - a_2 (\alpha_B + \alpha_n) - a_0 V - \\ - a_1 \left(\frac{d\alpha_B}{dt} + \frac{d\alpha_n}{dt} \right) - a_3 \delta_B - a'_3 \frac{d\delta_B}{dt} \end{cases}, \quad (7)$$

где V – путевая скорость полета; l_2 и a_2 – коэффициенты, характеризующие продольную статиче-

скую устойчивость АЛА; l_4 и a_6 – коэффициенты, характеризующие устойчивость АЛА при изменении угла наклона траектории; a_4 – коэффициент, характеризующий способность АЛА менять траекторию движения; a_0 , a_7 и l_1 – коэффициенты, характеризующие устойчивость АЛА по скорости; θ – угол наклона траектории; ψ – угол тангажа; ω_z – угловая скорость АЛА в продольной плоскости. α_B – дополнительный угол атаки; α_{Π} – путевой угол атаки; δ_B – возмущающий момент, приведенный к эквивалентному отклонению руля; a_3 – коэффициент, характеризующий эффективность руля высоты; a'_3 – коэффициент, характеризующий запаздывание скоса потока на крыле при вращении руля высоты.

Скоростные слагаемые, а также слагаемые с величиной δ_B , производными $\frac{d\delta_B}{dt}$ и $\frac{d\alpha_B}{dt} + \frac{d\alpha_{\Pi}}{dt}$

являются характерными для АЛА, построенных по схеме «утка». Для описания стандартной самолетной схемы эти слагаемые играют не столь существенную роль, поэтому в системе уравнений (7) этими слагаемыми можно пренебречь.

Угол наклона траектории θ (8):

$$\psi - (\alpha_B + \alpha_{\Pi}). \quad (8)$$

Таким образом, система имеет вид (9):

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = a_4(\alpha_B + \alpha_{\Pi}) + a_6(\psi - \alpha_B - \alpha_{\Pi}) \\ \frac{d\psi}{dt} = \omega_z \\ \frac{d\omega_z}{dt} = -a_1\omega_z - a_2(\alpha_B + \alpha_{\Pi}) \end{cases}. \quad (9)$$

Производная угла наклона траектории есть величина, зависящая от угла тангажа и угловой скорости продольного движения (10):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\psi}{dt} - \left(\frac{d\alpha_B}{dt} + \frac{d\alpha_{\Pi}}{dt} \right) = \frac{d\psi}{dt} - \frac{d\alpha_{\Pi}}{dt} = \omega_z - \frac{d\alpha_{\Pi}}{dt}. \quad (10)$$

Тогда система дифференциальных уравнений имеет вид (11):

$$\begin{cases} \frac{d\alpha_{\Pi}}{dt} = \omega_z + \alpha_B(a_6 - a_4) + \alpha_{\Pi}(a_6 - a_4) - a_6\psi \\ \frac{d\psi}{dt} = \omega_z \\ \frac{d\omega_z}{dt} = -a_1\omega_z - a_2\alpha_B - a_2\alpha_{\Pi} \end{cases}. \quad (11)$$

Из рис. 1 следует, что $\sin \alpha_B = \frac{w_y}{V}$, где w_y – вертикальная скорость возмущения. Так как

вертикальная составляющая возмущения много меньше путевой скорости ($w_y \ll V$), то, в соответствии с рис. 1, дополнительный угол атаки имеет вид (12):

$$\alpha_B = \frac{w_y}{V}. \quad (12)$$

Таким образом, система дифференциальных уравнений (7) имеет вид (13):

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = \omega_z \\ \frac{d\omega_z}{dt} = -a_1\omega_z - a_2\frac{w_y}{V} - a_2\alpha_{\Pi} \\ \frac{d\alpha_{\Pi}}{dt} = \omega_z + \frac{w_y}{V}(a_6 - a_4) + \alpha_{\Pi}(a_6 - a_4) - a_6\psi \end{cases}. \quad (13)$$

Систему дифференциальных уравнений также можно представить в матрично-векторном виде (14):

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (14)$$

где x – вектор состояния; u – вектор внешнего воздействия (вертикальное возмущение); A и B – матрицы коэффициентов для векторов состояния и воздействия соответственно.

Вектор состояния будет иметь вид (15):

$$x = \begin{bmatrix} \psi \\ \omega_z \\ \alpha_{\Pi} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Тогда матрица A имеет вид (16):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -a_1 & -a_2 \\ -a_6 & 1 & a_6 - a_4 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Матрица B (17):

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-a_2}{V} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a_6 - a_4}{V} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Моделирование систем дифференциальных уравнений в матрично-векторном виде и формирование передаточных функций проводилось в программе MATLAB. Использовались коэффициенты модели АЛА, построенной на основе легкомоторного самолета «Як-54» 1993 года выпуска.


```

A = [-0.07 0 -9.81 0; 0.004 -0.66 0.66 0; 0 0 0 1; 0 0.78 -0.78 0.46];
B = [-0.07 0 0 0; 0 0.004 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0];
C = eye (4);
D = zeros (4);
P = ss (A,B,C,D)
lA = tf (P)
lAl = zpk (P)
Al = [0 1 0; 0 0.46 -0.78; 0 1 -0.66];
Bl = [0 0 0; 0 -0.078 0; 0 0 -0.066];
Cl = eye (3);
Dl = zeros (3);
Pl = ss (Al,Bl,Cl,Dl)
la = tf (Pl)
lal = zpk (Pl)

```

% Матрица A для горизонтального ветра
 % Матрица B для горизонтального ветра

% Матрица A для вертикального ветра
 % Матрица B для вертикального ветра

Рис. 2. Код программы

Была написана программа с использованием стандартных функций среды:

- ss(state-space model) – построение уравнений (модели) в пространстве состояний;
- tf (transfer function or convert to transfer function) – построение передаточной функции или преобразование в передаточную функцию в явном виде;
- zpk (zero-pole-gain model or converts to zero-pole-gain format) – аформирование модели с нулевым коэффициентом усиления или преобразование модели в формат с нулевым коэффициентом усиления, то есть передаточная функция формируется в более удобном формате (без раскрытия скобок со слагаемыми).

Код программы показан на рис. 2.

Передаточные функции для горизонтального возмущения приведены на рис. 3; 4.

По числу строк матрицы **A** выдается 4 передаточные функции. Число каналов (выходов) зависит от элементов матрицы **B**, располагаемых на главной диагонали матрицы и используемых в качестве коэффициентов в числителе передаточной функции.

Так как элементы 3 и 4 главной диагонали матрицы **B** равны 0, передаточные функции каналов 3 и 4 равны 0.

Результаты выполнения функции *ztk* для горизонтального возмущения приведены на рис. 4.

Так как 3 и 4 элементы матрицы **B** равны 0, передаточные функции каналов 3 и 4 равны 0.

Передаточные функции для вертикального возмущения приведены на рис. 5.

Так как первый элемент главной диагонали матрицы **B** равен 0, передаточные функции канала 1 равны 0.

Результаты выполнения функции *ztk* вертикального возмущения приведены на рис. 6.

Так как первый элемент главной диагонали матрицы **B** равен 0, передаточные функции канала 1 равны 0.

Коэффициенты, полученные в результате формирования передаточных функций, необходимы для учета влияния возмущений АЛД при формировании траектории с целью встречи с другим АЛД. Для анализа выбранной передаточной функции АЛД необходима система,

From input 1 to output...

$$1: \frac{-0.07 s^3 - 0.014 s^2 - 0.03335 s - 1.69e-17}{s^4 + 0.27 s^3 + 0.4904 s^2 + 0.03335 s + 0.03061}$$

$$2: \frac{-0.00028 s^2 + 0.0001288 s - 0.0002184}{s^4 + 0.27 s^3 + 0.4904 s^2 + 0.03335 s + 0.03061}$$

$$3: \frac{-0.0002184}{s^4 + 0.27 s^3 + 0.4904 s^2 + 0.03335 s + 0.03061}$$

$$4: \frac{-0.0002184 s}{s^4 + 0.27 s^3 + 0.4904 s^2 + 0.03335 s + 0.03061}$$

а)

From input 2 to output...

$$1: \frac{-0.03061}{s^4 + 0.27 s^3 + 0.4904 s^2 + 0.03335 s + 0.03061}$$

$$2: \frac{0.004 s^3 - 0.00156 s^2 + 0.002991 s + 0.0002184}{s^4 + 0.27 s^3 + 0.4904 s^2 + 0.03335 s + 0.03061}$$

$$3: \frac{0.00312 s + 0.0002184}{s^4 + 0.27 s^3 + 0.4904 s^2 + 0.03335 s + 0.03061}$$

$$4: \frac{0.00312 s^2 + 0.0002184 s}{s^4 + 0.27 s^3 + 0.4904 s^2 + 0.03335 s + 0.03061}$$

б)

Рис. 3. Передаточные функции для горизонтального возмущения

АЭРОКОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<p>From input 1 to output...</p> <p>1: $\frac{-0.07 s (s^2 + 0.2s + 0.4764)}{(s^2 + 0.0393s + 0.0754) (s^2 + 0.2307s + 0.4059)}$</p> <p>2: $\frac{-0.00028 (s^2 - 0.46s + 0.78)}{(s^2 + 0.0393s + 0.0754) (s^2 + 0.2307s + 0.4059)}$</p> <p>3: $\frac{-0.0002184}{(s^2 + 0.0393s + 0.0754) (s^2 + 0.2307s + 0.4059)}$</p> <p>4: $\frac{-0.0002184 s}{(s^2 + 0.0393s + 0.0754) (s^2 + 0.2307s + 0.4059)}$</p>	<p>From input 2 to output...</p> <p>1: $\frac{-0.030607}{(s^2 + 0.0393s + 0.0754) (s^2 + 0.2307s + 0.4059)}$</p> <p>2: $\frac{0.004 (s+0.07) (s^2 - 0.46s + 0.78)}{(s^2 + 0.0393s + 0.0754) (s^2 + 0.2307s + 0.4059)}$</p> <p>3: $\frac{0.00312 (s+0.07)}{(s^2 + 0.0393s + 0.0754) (s^2 + 0.2307s + 0.4059)}$</p> <p>4: $\frac{0.00312 s (s+0.07)}{(s^2 + 0.0393s + 0.0754) (s^2 + 0.2307s + 0.4059)}$</p>
--	--

a)
б)

Рис. 4. Результаты выполнения функции ztk для горизонтального возмущения

<p>From input 2 to output...</p> <p>1: $\frac{-0.078 s - 0.05148}{s^3 + 0.2 s^2 + 0.4764 s}$</p> <p>2: $\frac{-0.078 s - 0.05148}{s^2 + 0.2 s + 0.4764}$</p> <p>3: $\frac{-0.078}{s^2 + 0.2 s + 0.4764}$</p>	<p>From input 3 to output...</p> <p>1: $\frac{0.05148}{s^3 + 0.2 s^2 + 0.4764 s}$</p> <p>2: $\frac{0.05148}{s^2 + 0.2 s + 0.4764}$</p> <p>3: $\frac{-0.066 s + 0.03036}{s^2 + 0.2 s + 0.4764}$</p>
---	---

a)
б)

Рис. 5. Результаты выполнения функции ztk для горизонтального возмущения

<p>From input 2 to output...</p> <p>1: $\frac{-0.078 (s+0.66)}{s (s^2 + 0.2s + 0.4764)}$</p> <p>2: $\frac{-0.078 (s+0.66)}{(s^2 + 0.2s + 0.4764)}$</p> <p>3: $\frac{-0.078}{(s^2 + 0.2s + 0.4764)}$</p>	<p>From input 3 to output...</p> <p>1: $\frac{0.05148}{s (s^2 + 0.2s + 0.4764)}$</p> <p>2: $\frac{0.05148}{(s^2 + 0.2s + 0.4764)}$</p> <p>3: $\frac{-0.066 (s-0.46)}{(s^2 + 0.2s + 0.4764)}$</p>
--	---

a)
б)

Рис. 6. Результаты выполнения функции ztk вертикального возмущения

которая в режиме реального времени может анализировать характеристики, необходимые для формирования траектории [3] с учетом влияния возмущений.

Выводы

1. Рассмотрены системы дифференциальных уравнений, необходимые для формирования передаточных функций АЛА самолетной схемы,

с учетом горизонтального и вертикального возмущений.

2. Полученные системы дифференциальных уравнений позволили математически раскрыть влияние возмущений на АЛА в каждой из проекций. Представление систем в матрично-векторном виде позволило облегчить вычисления передаточных функций. В результате передаточные функции были получены в программе MATLAB с помощью встроенных функций по формированию. Коэффициенты передаточных функций позволят учитывать влияние возмущений моделью АЛА в системе обеспечения встречи.

3. Интеллектуализация системы управления позволит анализировать полученные функции в режиме реального времени для построения оптимальной траектории полета, что необходимо для обеспечения встречи.

Библиографический список

1. Мамедова Л. С., Небылов А. В. Игровая динамическая задача управления как метод обеспечения встречи малых автоматических летательных аппаратов // 73-я Международ. студ. науч. конф. ГУАП. СПб., 13–17 апр. 2020 г., СПб.: ГУАП, 2020. С. 26–30.
2. Хованский Ю. М., Пономарев В. К. Стабилизация летательных аппаратов. Динамические характеристики летательного аппарата / Ю. М. Хованский, В. К. Пономарев. Л.: ЛЭТИ, 1979. 72 с.
3. Analysis and Simulation of Route Trajectory Option for Aircraft-Type Drones / V. Perliouk, H. X. Yang, A. Nebylov, L. Mamedova // European Control Conference 2020 (ECC-2020). Russia, Saint Petersburg, 13–15 May 2020. SPb., 2020. P. 1662–1664.

УДК 621.396.969.14:629.7.05

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-56-59

А. С. Мурзаев*

магистрант

В. Н. Коврегин*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КАНАЛ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ФОНЕ ЗАДАЧ РАДАРА ПРИ ОБЗОРЕ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

Предложен метод определения скорости летательного аппарата (ЛА) – носителя многофункционального радиолокатора с квазинепрерывным излучением по отраженным сигналам от участков земной поверхности, формируемых боковыми лепестками диаграммы направленности антенны радара. Осуществляется прогноз дальности до земли по боковым лепесткам; прогноз спектра отраженного сигнала по боковому лепестку; доплеровские измерения скоростей по направлениям боковых лепестков, определяется скорость ЛА на направление боковых лепестков, формируются данные для дальнейшей фильтрации калмановского типа.

Ключевые слова: радиолокатор с квазинепрерывным излучением, мешающие отражения, боковые лепестки, линейно-частотная модуляция, интеграция данных.

A. S. Murzaev*

Postgraduate Student

V. N. Kovregin*

PhD, Tech., Senior Research Employee

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INTEGRATED INERTIAL-RADAR CHANNEL FOR ESTIMATING THE VELOCITY OF THE AIRCRAFT AGAINST THE BACKGROUND OF RADAR TASKS WHEN REVIEWING THE AIRSPACE

A method is proposed for determining the velocity of a multi-functional radar carrier aircraft with quasi-continuous radiation from reflected signals from sections of the earth's surface formed by the side lobes of the radar antenna directivity diagram. Is the forecast range to the ground on the lateral petals; the prediction of the spectrum of the reflected signal on the side lobe; Doppler measurements of velocities in the directions of side lobes is determined by the speed of the aircraft, formed the data for further filtering.

Keywords: radar with quasi-continuous radiation, interfering reflections, side lobes, linear frequency modulation, data integration.

Введение

Повышение точности оценок навигационных параметров является актуальной задачей по сей день. Высокая точность особенно важна при решении специальных задач навигации, например, отслеживании движения фазового центра антенны (ФЦА) радара и компенсации траекторных нестабильностей. Традиционным решением этой и подобных задач является [1–3] применение комплексированных систем, где в качестве информационного «ядра» выступает инерциальный канал, а в качестве корректора данные от аппаратуры потребителя спутниковой навигационной системы. Однако при высокой потенциальной точности спутниковый канал характери-

зуется низкой помехоустойчивостью, «срывами» измерений при выходе из зоны видимости и другими факторами, приводящими к снижению эффективности работы навигационной и даже нарушениям их работоспособности в условиях высокодинамичной и сложной помеховой обстановки. В силу указанных причин ведутся работы по использованию дополнительного корректора инерциальной подсистемы. В частности, в [4] рассмотрен метод оценки скорости ЛА при картографировании, также возможен вариант использования многофункциональной бортовой радиолокационной станции (МБРЛС) в качестве доплеровского измерителя скорости. Однако такие методы предполагают, что главный луч (ГЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА) направ-

лен вниз на землю. Когда МБРЛС осуществляет обзор воздушного пространства, ГЛ ДНА направлен околоразностное пространство и выше, но боковые лепестки (БЛ) ДНА могут быть направлены на земную поверхность и производить мощные отражения от земли, традиционно называемых мешающими отражениями (МО). Предлагаемый метод посвящен рассмотрению возможности оценки скорости ЛА на основе информации, содержащейся в МО при известной ориентации ГЛ в пространстве и БЛ относительно ГЛ, и дальнейшей интеграции данных с навигационной системой.

Постановка задачи

Рассматривается типовой импульсно-доплеровский радар Х-диапазона с электронным сканированием узким ГЛ воздушного пространства при прямолинейном полете ЛА. Навигационное обеспечение радара осуществляется с помощью инерциальной навигационной системы (ИНС).

Со стороны МБРЛС считаются известными азимутальный угол ($\alpha_{ГЛ}$) и угол места ($\beta_{ГЛ}$) ГЛ ДНА в текущий момент времени, при этом значение угла места является положительным; известны азимутальные углы ($\alpha_{БЛ}$) и углы места ($\beta_{БЛ}$) максимумов в азимутальной и угломестной плоскостях всех интересующих БЛ относительно ГЛ, а также ширина каждого БЛ в азимутальной ($\Delta\alpha$) и угломестной плоскости ($\Delta\beta$), МБРЛС принимает мощные МО от участков земной поверхности, облучаемых БЛ при квазинепрерывном излучении. Квазинепрерывный сигнал с высокой частотой повторения импульсов излучает сигнал с некоторой назначенной крутизной линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ).

Со стороны ИНС известны параметры позиционирования и движения ФЦА радара во время излучения зондирующих импульсов: геометрическая высота (H), истинный курс ($\psi_{ист}$), угол тангажа (θ), угол крена (γ), а также проекции скорости в навигационной системе координат (НСК) (V_N, V_H, V_E).

Задача состоит в определении радиальных скоростей по направлениям БЛ по отраженным сигналам от земной поверхности.

Подход к решению задачи

Для каждого БЛ определяются прогнозные дальности и частоты при заданной крутизне ЛЧМ для пяти точек, принадлежащих следу бокового лепестка:

– для левой границы следа с заданными угловыми параметрами $\alpha = \alpha_{БЛ} - 0,5\Delta\alpha$ и $\beta = \beta_{БЛ}$;

– для правой границы следа с заданными угловыми параметрами $\alpha = \alpha_{БЛ} + 0,5\Delta\alpha$ и $\beta = \beta_{БЛ}$;

– для дальней границы следа с заданными угловыми параметрами $\alpha = \alpha_{БЛ}$ и $\beta = \beta_{БЛ} - 0,5\Delta\beta$;

– для ближней границы следа с заданными угловыми параметрами $\alpha = \alpha_{БЛ}$ и $\beta = \beta_{БЛ} + 0,5\Delta\beta$;

– для центра следа с заданными угловыми параметрами $\alpha = \alpha_{БЛ}$ и $\beta = \beta_{БЛ}$.

Общий алгоритм вычисления прогнозируемых координат одной из пяти обозначенных точек следа выглядит следующим образом:

1. Вычисляются прогнозируемые координаты в системе координат связанной с ГЛ:

$$x_0 = \frac{H \cos \alpha}{|tg \beta|}, \quad (1)$$

$$y_0 = -H, \quad (2)$$

$$z_0 = \frac{H \sin \alpha}{|tg \beta|}. \quad (3)$$

2. Определяются прогнозируемые координаты в НСК

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{B}_{\alpha_{ГЛ}, \beta_{ГЛ}, \gamma} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{B}_{\alpha_{ГЛ}, \beta_{ГЛ}, \gamma}$ – матрица направляющих косинусов, определяющая ориентацию системы координат связанной с ГЛ относительно НСК.

3. Определяются координаты точки пересечения направления БЛ с плоскостью земли:

$$k_{xy} = \frac{y}{x}, \quad (5)$$

$$x = \frac{-H}{k_{xy}}, \quad (6)$$

$$k_{zy} = \frac{y}{z}, \quad (7)$$

$$z = \frac{-H}{k_{zy}}, \quad (8)$$

$$y = -H. \quad (9)$$

Если полет совершается над морской поверхностью или другой поверхностью, которую можно считать плоской, то дальность до заданной точки следа БЛ можно вычислить как:

$$D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \quad (10)$$

Если полет совершается над поверхностью земли и имеется цифровая карта рельефа, то производится соотнесение прогнозируемых координат с картой рельефа.

ординат, определяется высота в точке с координатами x , z и производится перерасчет прогнозируемых координат с новой высотой H_p вместо изначально заданной геометрической высоты H , и дальность определяется по формуле (10).

После определения координаты центра и границ следа БЛ, а также дальностей до них, определяются проекции скорости на направления:

$$V_{\text{ц}} = \frac{V_N x_{\text{ц}} + V_H y_{\text{ц}} + V_E z_{\text{ц}}}{D_{\text{ц}}}, \quad (11)$$

где $V_{\text{ц}}$ – проекция скорости ЛА на направление до центра следа БЛ; $x_{\text{ц}}$, $y_{\text{ц}}$, $z_{\text{ц}}$ – прогнозируемые координаты центра следа БЛ; $D_{\text{ц}}$ – дальность до центра следа БЛ;

$$V_{\text{ЛГ}} = \frac{V_N x_{\text{ЛГ}} + V_H y_{\text{ЛГ}} + V_E z_{\text{ЛГ}}}{D_{\text{ЛГ}}}, \quad (12)$$

где $V_{\text{ЛГ}}$ – проекция скорости ЛА на направление до левой границы следа БЛ; $x_{\text{ЛГ}}$, $y_{\text{ЛГ}}$, $z_{\text{ЛГ}}$ – прогнозируемые координаты левой границы следа БЛ; $D_{\text{ЛГ}}$ – дальность до левой границы следа БЛ;

$$V_{\text{ПГ}} = \frac{V_N x_{\text{ПГ}} + V_H y_{\text{ПГ}} + V_E z_{\text{ПГ}}}{D_{\text{ПГ}}}, \quad (13)$$

где $V_{\text{ПГ}}$ – проекция скорости ЛА на направление до правой границы следа БЛ; $x_{\text{ПГ}}$, $y_{\text{ПГ}}$, $z_{\text{ПГ}}$ – прогнозируемые координаты правой границы следа БЛ; $D_{\text{ПГ}}$ – дальность до правой границы следа БЛ;

$$V_{\text{ДГ}} = \frac{V_N x_{\text{ДГ}} + V_H y_{\text{ДГ}} + V_E z_{\text{ДГ}}}{D_{\text{ДГ}}}, \quad (14)$$

где $V_{\text{ДГ}}$ – проекция скорости ЛА на направление до дальней границы следа БЛ; $x_{\text{ДГ}}$, $y_{\text{ДГ}}$, $z_{\text{ДГ}}$ – прогнозируемые координаты дальней границы следа БЛ; $D_{\text{ДГ}}$ – дальность до дальней границы следа БЛ;

$$V_{\text{БГ}} = \frac{V_N x_{\text{БГ}} + V_H y_{\text{БГ}} + V_E z_{\text{БГ}}}{D_{\text{БГ}}}, \quad (15)$$

где $V_{\text{БГ}}$ – проекция скорости ЛА на направление до ближней границы следа БЛ; $x_{\text{БГ}}$, $y_{\text{БГ}}$, $z_{\text{БГ}}$ – прогнозируемые координаты ближней границы следа БЛ; $D_{\text{БГ}}$ – дальность до ближней границы следа БЛ.

Тогда для назначенной крутизны можно спрогнозировать дальномерные частоты сигнала:

$$F_{\text{дмч.ц}} = \frac{2V_{\text{ц}}}{\lambda} + \frac{2D_{\text{ц}}}{c} S, \quad (16)$$

$$F_{\text{дмч.ЛГ}} = \frac{2V_{\text{ЛГ}}}{\lambda} + \frac{2D_{\text{ЛГ}}}{c} S, \quad (17)$$

$$F_{\text{дмч.ПГ}} = \frac{2V_{\text{ПГ}}}{\lambda} + \frac{2D_{\text{ПГ}}}{c} S, \quad (18)$$

$$F_{\text{дмч.ДГ}} = \frac{2V_{\text{ДГ}}}{\lambda} + \frac{2D_{\text{ДГ}}}{c} S, \quad (19)$$

$$F_{\text{дмч.БГ}} = \frac{2V_{\text{БГ}}}{\lambda} + \frac{2D_{\text{БГ}}}{c} S, \quad (20)$$

где в (16)–(20) $F_{\text{дмч.ц}}$ – прогнозируемая дальномерная частота сигнала от центра следа БЛ; $F_{\text{дмч.ЛГ}}$ – прогнозируемая дальномерная частота сигнала от левой границы следа БЛ; $F_{\text{дмч.ПГ}}$ – прогнозируемая дальномерная частота сигнала от правой границы следа БЛ; $F_{\text{дмч.ДГ}}$ – прогнозируемая дальномерная частота сигнала от дальней границы следа БЛ; $F_{\text{дмч.БГ}}$ – прогнозируемая дальномерная частота сигнала от ближней границы следа БЛ; λ – длина волны излучаемого сигнала; S – крутизна ЛЧМ зондирующего сигнала; c – скорость света;

После проведения расчетов излучается зондирующий сигнал с заданной крутизной ЛЧМ и после обработки принятого сигнала получают спектр МО, формируемых БЛ. В области границ прогнозных дальномерных частот отыскивается максимум амплитуды спектра и частота при этом максимуме $F_{\text{дмч.изм}}$.

$$F_{\text{дмч.изм}} = \frac{2V_{\text{БЛ ист}}}{\lambda} + \frac{2a_{\text{БЛ ист}}}{\lambda} \times \times \frac{2D_{\text{БЛ ист}}}{c} + \frac{2D_{\text{БЛ ист}}}{c} S + \Delta F_{\text{дмч.изм}}, \quad (21)$$

где $F_{\text{дмч.изм}}$ – измеренная дальномерная частота; $V_{\text{БЛ ист}}$ – истинная радиальная скорость по направлению бокового лепестка, $a_{\text{БЛ ист}}$ – истинное ускорение по направлению БЛ; $D_{\text{БЛ ист}}$ – истинная дальность до следа БЛ.

При рассмотрении маломаневренного ЛА, например, вертолета, можно исключить составляющую, содержащую ускорение и рассматривать ее как погрешность измерения дальномерной частоты.

Предполагается, что максимум должен находиться вблизи центра следа БЛ, тогда прогнозную дальномерную частоту можно представить как

$$F_{\text{дмч.ц}} = \frac{2V_{\text{ц}}}{\lambda} + \frac{2D_{\text{ц}}}{c} S = \frac{2V_{\text{БЛ ист}}}{\lambda} + \frac{2\Delta V_{\text{пр}}}{\lambda} + \frac{2D_{\text{БЛ ист}}}{c} S + \frac{2\Delta D_{\text{пр}}}{c} S, \quad (22)$$

где $\Delta V_{\text{пр}}$ – ошибка прогнозирования проекции скорости ЛА на направление БЛ; $\Delta D_{\text{пр}}$ – ошибка прогнозирования дальности до следа БЛ.

Применяя полученные данные, можно получить информацию о погрешностях ИНС с помощью комплексирования с применением фильтра разностного сигнала калмановского типа.

Формируется невязка:

$$v_F = F_{\text{дмч.изм}} - F_{\text{дмч.ц}} = \Delta F_{\text{дмч.изм}} - \frac{2\Delta V_{\text{пр}}}{\lambda} - \frac{2\Delta D_{\text{пр}}}{c} S = \Delta F_{\text{дмч.изм}} - \Delta F_{\text{дмч.ц}}, \quad (23)$$

где $\Delta F_{\text{дмч. пр}}$ – погрешность прогнозирования дальномерной частоты.

Частотную невязку несложно перевести в скоростную:

$$v_V = V_{\text{изм}} - V_{\text{ц}} = \frac{2v_F}{\lambda} = \frac{2\Delta F_{\text{дмч.изм}}}{\lambda} - \frac{2\Delta F_{\text{дмч.ц}}}{\lambda}. \quad (24)$$

Ошибка прогнозирования дальномерной частоты $\Delta F_{\text{дмч. пр}}$ в своем составе имеет погрешность определения геометрической высоты, погрешность определения углов ориентации главного луча в НСК, погрешности определения углов ориентации ЛА, погрешности определения проекций скорости ЛА в НСК.

Полученная невязка обрабатывается в фильтре Калмана, и на выходе имеем оценки ошибок определения углов ориентации главного луча в НСК, ошибкоопределения углов ориентации ЛА и ошибок определения проекций скорости ЛА в НСК.

Рассмотрен случай для одного канала измерения радиальной скорости, в общем случае число таких каналов ограничено лишь числом БЛ, которые могут производить МО.

Заключение

Предложенный метод позволяет определить скорость носителя на направление БЛ, а также использовать это наблюдение при фильтрации. Применение данного метода позволяет использовать радиолокатор в качестве дополнительного корректора в случае невозможности использования данных аппаратуры спутниковой навигационной системы даже при обзоре воздушного пространства, когда ГЛ ДНА направлен выше горизонта.

Библиографический список

1. Инерциально-спутниковая система микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / А. В. Чернодаров, А. П. Патрикеев, В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // *Новости навигации*. 2016. № 4. С. 12–15.
2. Чернодаров А. В., Патрикеев А. П., Коврегин В. Н. и др. Летная отработка распределенной системы инерциально-спутниковой микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой // *Науч. вестн. МГТУ ГА*, 2017. Т. 20, № 0 1. С. 222–231.
3. Использование инерциально-спутниковой навигационной системы для определения параметров движения фазового центра антенны радиолокатора / А. В. Чернодаров, А. П. Патрикеев, В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // *XXIII Санкт-Петербург. Международный конф. по интегрированным навигационным системам: сб. докл.* 2016 г. С. 266–274
4. Савостьянов В. Ю., Степанов М. В. Измерение скорости движения носителя в моноимпульсном радиолокаторе с синтезированной апертурой антенны // *Радиотехника и электроника*. 2007. Т. 52, № 8. С. 944–948.

УДК 629.7.067

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-60-65

Д. М. Руцик*

магистрант

К. Н. Тимофеев*

кандидат технических наук

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА

Проведен краткий обзор причин авиационных происшествий, том числе по вине экипажей. Представлены структуры систем обеспечения безопасности полета, основанные на современных системах контроля состояния экипажа, в том числе с использованием 3D-пролетных камер (ToF) и глубоких нейронных сетей.

Ключевые слова: бортовая аппаратура, безопасность полета, человеческий фактор, компьютерное зрение, нейронные сети.

D. M. Rutsik*

Postgraduate Student

K. N. Timofeev*

PhD, Tech.

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INTELLIGENT ON-BOARD SYSTEMS FLIGHT SAFETY

A brief overview of the causes of aircraft accidents, including the fault of the crews, is carried out. Structures of flight safety systems based on modern systems for monitoring the state of the crew, including using 3D flight cameras (ToF) and deep neural networks, are presented.

Keywords: onboard equipment, flight safety, human factor, computer vision, neural networks

Введение

Рост спроса на воздушные перемещения грузов и пассажиров, является общемировой тенденцией, которая безусловно сохранится и будущем. По данным сайта International Civil Aviation Organization, в 2016 г. каждый день производилось около 100000 рейсов, перевозивших грузы общей стоимостью примерно на 18 млрд долл. и более 10 млн пассажиров [1]. С каждым годом эти цифры растут, что требует постоянного совершенствования систем обеспечения высокого уровня безопасности полетов.

Согласно данным сайта PlaneCrashInfo.com, ежегодное число авиационных катастроф, в которых погибло больше 18 человек, уменьшается последние 50 лет [2]. При эксплуатации современного парка воздушных судов принимаются множественные меры по предотвращению столкновений самолетов на взлетно-посадочной полосе и в воздухе.

В то же время статистика показывает, что авиационные катастрофы, как правило, оставляют мало шансов на выживание находящимся на борту ВС пассажирам и экипажу. В соот-

ветствии с данными PlaneCrashInfo.com, число людей, переживших авиационные катастрофы с человеческими жертвами, составляет всего 25–40% от общего количества людей на борту. В подавляющем большинстве случаев причиной авиакатастрофы является ошибка пилота (около 50% всех катастроф [2]). Совершенствование пилотажно-навигационного оборудования, внедрение современных вычислительных комплексов, обеспечивающих высокую точность и надежность за счет резервирования каналов обрабатываемой информации, приводит к уменьшению отказов на борту ВС. Однако общий процент авиационных инцидентов по вине пилота остается на недопустимо уровне. Стоит отметить, что качество обучения экипажа ВС находится сейчас на высоком уровне, что положительно сказывается на безопасности полетов, однако пилот остается человеком, которому свойственно совершать ошибки. С развитием науки становится все более реальной перспектива избавления от человеческого фактора при управлении ВС за счет использования искусственного интеллекта (ИИ). Но современные системы с ИИ для ВС не свободны от недостатков, что

подтверждают инциденты с Boeing 737 MAX. Рациональным решением, в среднесрочной перспективе, является комплексирование систем поддержки принятия решения (СППР) пилота с элементами ИИ, но убрать человеческий фактор из процесса пилотирования ВС невозможно. Одним из направлений совершенствования системы безопасности ВС является совершенствование мониторинга физического состояния пилота с применением глубоких сверточных сетей.

Анализ распространенных ошибок пилота

Как показывает статистика, ошибка пилота занимает первое место среди причин авиакатастроф с человеческими жертвами. Последние годы процент случаев крушения самолетов по вине пилота приближается к 60%, тогда как отказ бортового оборудования является причиной примерно 25% авиакатастроф [2]. При этом, как уже было отмечено выше, пилот самолета является незаменимой единицей. Поэтому необходимо проанализировать авиакатастрофы, произошедшие по вине пилота, и выработать стратегию уменьшения или предотвращения распространенных ошибок.

Изучение самых крупных авиакатастроф с человеческими жертвами показало, что человеческий фактор может оказывать влияние на безопасность полета в разной мере [3]. Доля крушений самолетов приходится на ошибку диспетчера наземных пунктов координации. Как правило, такие ошибки появляются вследствие усталости диспетчера из-за интенсивных смен, а значит, ситуацию может исправить распределением рабочих часов между большим количеством человек, иначе говоря, увеличить число рабочих в смену. Зафиксированы случаи, когда пилоты игнорировали команды диспетчера, желая скорее выйти на посадку или выйти на нужный эшелон, что также приводило к авиaproишествиям. Иногда простая невнимательность пилотов приводила к крушению самолета, когда при наборе скорости во избежание столкновения с землей оставался включенным воздушный тормоз. Замедленная реакция, неверные решения, невнимательность, неспособность взаимодействия с другими членами экипажа, все это, как правило, – следствие усталости, вызванное недостатком отдыха или высокой интенсивностью работы.

Аналогичные проблемы других видов транспорта и их решение

Схожие проблемы наблюдаются и при анализе аварий других видов транспорта. Автомоби-

ли значительно проще в управлении, чем самолеты, длительность поездки меньше длительности полета, однако автокатастрофы происходят чрезвычайно часто, и в том числе по вине уставшего водителя, потерявшего бдительность или вовсе уснувшего за рулем [4]. Железнодорожный транспорт также интересен в рассмотрении, особенно с точки зрения длительности поездки. Машинист может долгое время следовать по маршруту, предпринимая при этом минимум активных действий. Если он не имел возможности предварительно отдохнуть, вполне вероятным является сон на рабочем месте, который может привести к серьезной катастрофе на железной дороге.

Для предотвращения подобных инцидентов на железной дороге используется телемеханическая система контроля бодрствования машиниста (ТСКБМ) [5]. Она следит за состоянием машиниста, контролируя, чтобы он находился в работоспособном состоянии. Если машинист начал засыпать или потерял сознание вследствие, например, удара током, система запросит ответ через нажатие на специальную рукоять. Не получив ответа, система произведет размыкание электроцепи и произойдет торможение состава. Таким образом, предотвращаются возможные аварии и катастрофы по причине выхода из строя машиниста.

Схожие по принципу мониторинга состояния системы применяются и в авиации. Такие системы определяют частоту сердечных сокращений и дыхания, степень давления пилота на штурвал и педали, изменение положения тела на кресле и ряд других. Таким образом определяется текущее состояние пилота, анализ которого производится с высокой точностью [6].

Более современным аналогом указанных выше систем является бортовая активная система безопасности полета (БАСБП) [7, 8]. Помимо контроля дыхания и давления на педали и ручки управления система определяет положение головы при помощи приемника видеосигнала и реакцию пилота на речевую информацию за счет записи звука в кабине. Помимо комплексной оценки состояния пилота, БАСБП способна отправлять на землю информацию об экстренной ситуации, связанной с состоянием пилота, а также брать на себя управление ВС для обеспечения безопасного режима полета. Такая система может существенно снизить человеческий фактор в процессе управления самолетом, однако на данный момент она применяется только на боевых и учебно-боевых самолетах. Схема взаимодействия датчиков БАСБП и бортовых систем показана на рис. 1 [7].

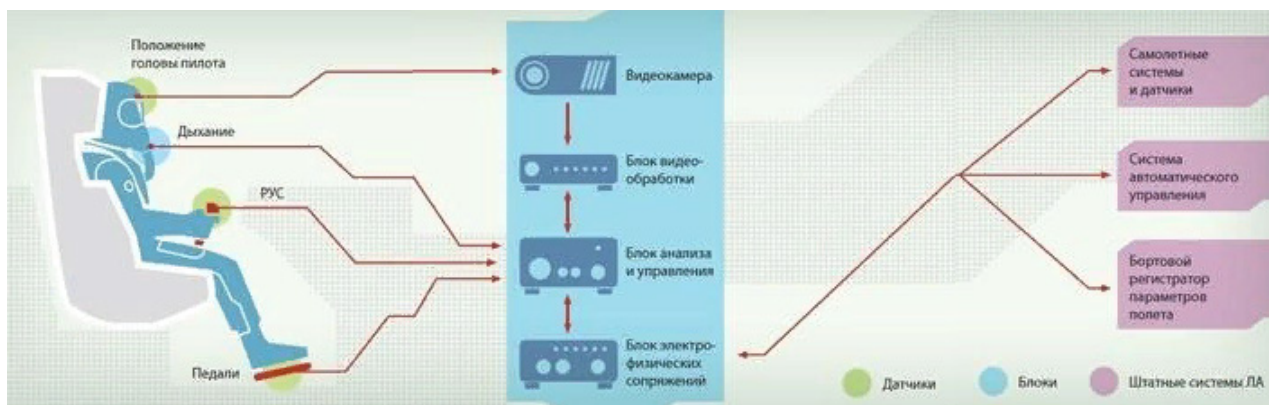


Рис. 1. Схема взаимодействия БАСБП с бортовыми системами

По этой причине получила развитие технология мониторинга ситуации в салоне автотранспортного средства [9]. Ключевая особенность разработки в использовании технологии компьютерного зрения для контроля ситуации в салоне (рис. 2). В настоящий момент уже разработано и поставляется в компании программное обеспечение для машинного обучения поддерживающее эту технологию. Таким образом, обеспечивается непрерывное наблюдение за водителем и пассажирами автомобиля, что предотвращает такие ситуации, как внезапное ухудшение состояния водителя, отвлечение его внимания из-за каких-либо происшествий в салоне, сон за рулем и т. п., приводящие к автомобильным катастрофам. В аварийно опасных ситуациях автомобиль может взять управление на себя или отправить сообщение в спасательную службу, что существенно увеличивает шанс на благоприятный исход сложившихся обстоятельств.

Применение современных разработок в авиации

В настоящий момент существует два подхода созданию бортовых активных систем безо-

пасности полетов. Первый основан на контроле, с применением датчиков, в том числе МЭМС, работоспособности пилота в масштабе реального времени. К таким изделиям, например, относится бортовая активная система безопасности полетов (БАСБП), в которой оценка работоспособности пилота включает в себя следующие показатели [7]:

- легочная вентиляция;
- длительность дыхательных пауз;
- обжатие ручки управления;
- усилие на педалях управления;
- положение головы;
- действия по управлению самолетом;
- работа с арматурой кабины;
- реакции летчика на речевую информацию и интеллектуальную подсказку.

БАСБП может применяться на самолетах типа МиГ-29, Су-27, Су-30, Як-130. Но такая система ориентирована на повышение безопасности полетов боевых или учебно-тренировочных самолетов. В гражданской авиации использование полного функционала такой БАСБП невозможно, так как пилоты не используют дыхательную маску и противоперегрузочный костюм, что делает невозможным контроль дыха-



Рис. 2. Применение компьютерного зрения для мониторинга салона автомобиля

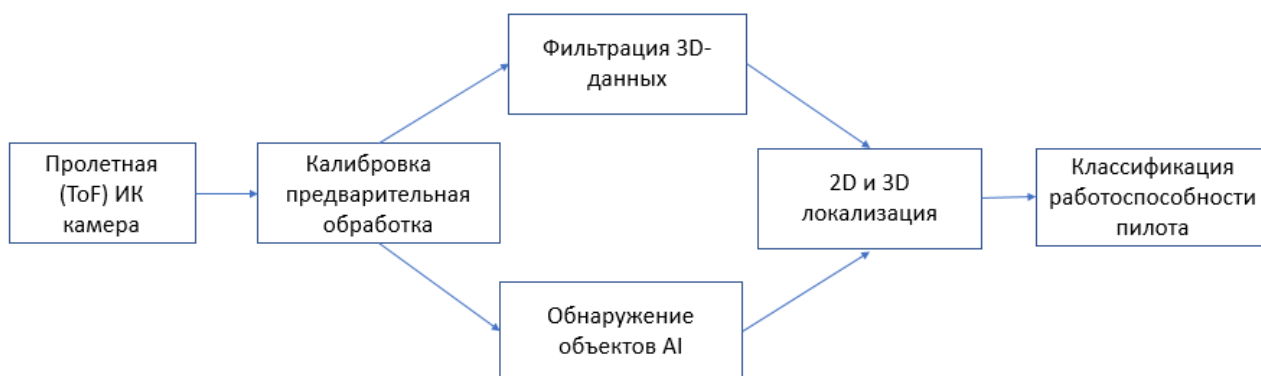


Рис. 3. Блок-схема алгоритма обнаружения пилота в кресле и захвата изображения

тельных пауз и легочную вентиляцию. К недостаткам таких систем можно отнести упрощенное и, на современном этапе, явно недостаточное применение методов и средств ИИ.

Второй подход – использование в активных системах безопасности полетов, глубоких нейронных сетей обученных на данных от 3D-пролетных камер. В настоящий момент технология 3D Time-of-Flight (ToF) обеспечивает зрение в сочетании с высоким разрешением и восприятием глубины с высокой точностью. Камера ToF, как и любой другой тип камеры, использует объектив для фокусировки света на датчике и один или несколько ИК-лазеров для освещения кабины ЛА. Поле зрения объектива, количество лазеров и их поле освещения определяют диапазон чувствительности ToF-камеры, а характеристики объектива определяют, как свет искажается при проецировании на пилотов. Информация с ToF-камеры подается на специализированных процессор предназначенный для обнаружения пилота (находится ли он в кресле) и захвата изображения. Блок-схема

алгоритма обнаружения пилота в кресле и захвата его изображения, прежде всего лица, приведена на рис. 3.

Предварительно обработанные 2D- и 3D-данные затем передаются в модель ИИ для анализа его работоспособности (задача классификации). Двумерные данные являются основным входом в модель ИИ, а трехмерные данные используются для «тонкой» настройки классификатора. Трехмерная глубинная визуализация является сложной задачей, поскольку необходимо учитывать множество переменных, чтобы результаты измерений соответствовали ожиданиям. Визуализация глубины включает в себя задачи, требующие тщательного воздействия на цель инфракрасного лазерного излучения, а затем точного измерения задержки между проходящим и отраженным светом – и делать это для каждого пикселя в датчике изображения.

В любой модели ИИ, надежность классификации определяются качеством, размером и разнообразием обучающих данных, и невозможно

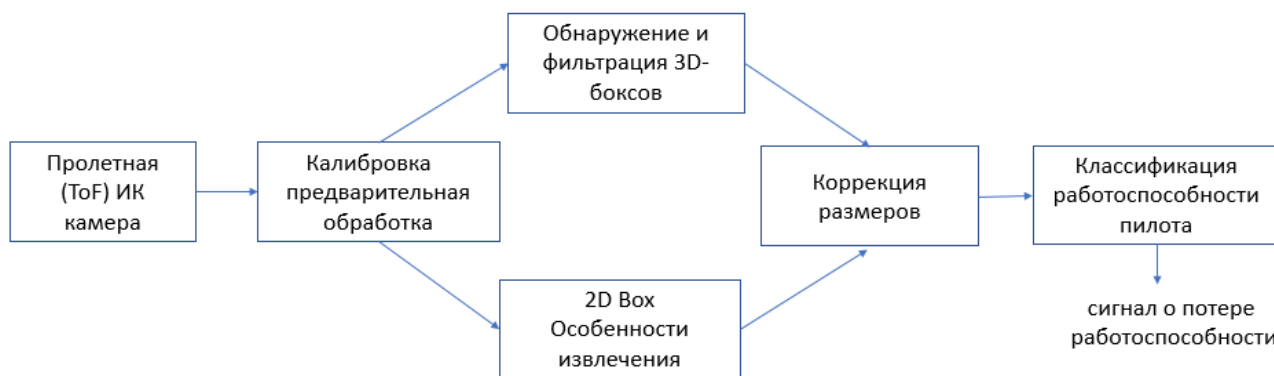


Рис. 4. Блок-схема алгоритма измерения объема ADI, показывающая обработку данных с 3D-камеры ToF

охватить все ситуации одним набором данных. Таким образом, предоставленная модель ИИ может быть улучшена с помощью переобучения, передачи обучения или извлечения функций, чтобы лучше охватить конкретные варианты использования.

При решении задачи классификации модель ИИ локализуются обрабатываемые объекты путем сопоставления их с изображением глубины, которое подверглось фильтрации, чтобы уменьшить паразитный шум, а также шум из-за краевых эффектов и отражений. Объекты (признаки), связанные с каждым из пилотов (система контролирует работоспособность обоих пилотов), идентифицируются и ставятся на сопровождения, для непрерывного мониторинга во время полета. В случае прохождения сигнала о потере работоспособности пилота происходит своевременного информирования членов экипажа и наземных служб о развитии опасной ситуации и необходимых действиях по ее предотвращению, а также за счет активного участия ИИ в контуре управления ЛА.

Применение вышеизложенного подхода является достаточно финансово затратным, что ограничивает его широкое применение в настоящий момент. Но применение алгоритмов и методов ИИ в авионике может идти и по более простому пути.

Одной из серьезных проблем, возникающих достаточно внезапно и при этом незаметно, является гипоксия или кислородное голодание. При постепенном наступлении гипоксии пилот может не заметить изменения в своем состоянии, при этом его мыслительные процессы затормаживаются, речь становится бессвязной, а в конечном итоге наступает потеря сознания. Опытные диспетчеры могут определить по голосу состояние гипоксии и указать на это пилоту, чтобы он предпринял меры (например, сни-

жение ВС) до потери сознания. Обученная нейронная сеть вместе с речевым модулем БАСБП сможет реагировать на странности в речи пилота, обнаруживая гипоксию на ранних стадиях и предотвращая крушение самолета.

Хорошим дополнением к формируемой системе контроля состояния экипажа воздушного судна станет включение в состав авионики бортовой системы автоматического возвращения вертолета (БСАВВ) [10], перенастроенной с учетом особенностей управления самолетом. В случае выхода экипажа из строя система должна выбрать аэродром для посадки, отвечающий следующим требованиям: простота захода на посадку, хорошие погодные условия, минимальное количество других летательных аппаратов поблизости и кратчайшее расстояние. Подобные аэродромы могут быть подсказаны диспетчерами, которые примут экстренный сигнал о сложившейся на борту ситуации от системы контроля. После переданных координат аэродрома самолет под управлением системы начинает движение в сторону цели и заходит на посадку под контролем диспетчера.

Таким образом, разрабатываемая система включает в себя следующие составные части (рис. 5).

1. Датчики:

- датчики изображения, формирующие основной массив данных о ситуации в кабине (данные обрабатываются при помощи технологии компьютерного зрения);
- звукозаписывающее устройство, используемое в качестве дополнительного источника информации при мониторинге кабины, – записывает разговоры, помогает определить уровень стресса экипажа и оценить адекватность реакции пилота на тестовые запросы речевого модуля;
- датчики давления на ручки управления и педали, позволяющие регистрировать управ-

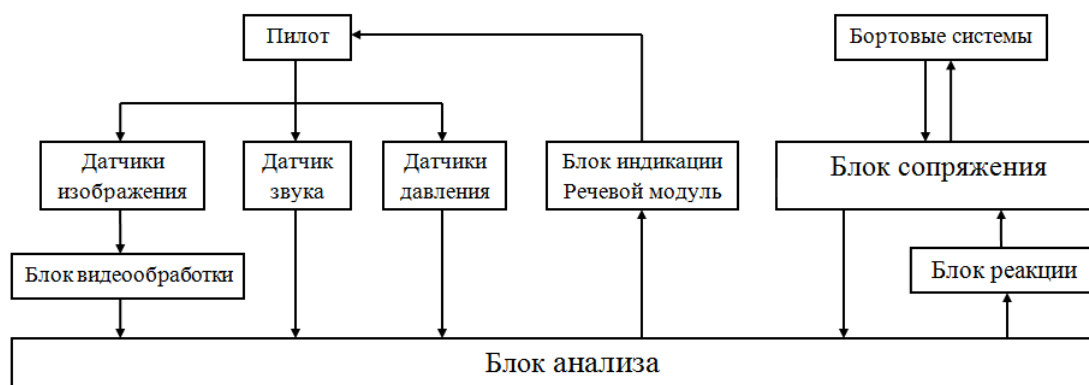


Рис. 5. Структурная схема разрабатываемой системы обеспечения безопасности полета

ляющие воздействия пилота и оценить уровень стресса в процессе маневров.

2. Блоки обработки:

– блок видеообработки, предназначенный для предварительной обработки изображения с датчиков, используя технологию компьютерного зрения;

– блок анализа, работу которого обеспечивает нейронная сеть, подготовленная по принципам машинного и глубокого обучения. Анализ производится на основе совокупности данных, полученных от блока видеообработки, блока сопряжения и устройства звукозаписи. На основании поступающей информации производится оценка безопасности полета и прогноз аварийных состояний, в том числе потеря работоспособности экипажа или вмешательство посторонних лиц в процесс управления ВС, и формируется соответствующее ситуации решение.

3. Блоки управления:

– блок реакции, формирующий массив управляющих воздействий, рассчитанных на основании принятых в блоке анализа решений. Управляющие воздействия передаются в блок сопряжения;

– блок сопряжения, необходимый для получения данных с датчиков самолета, параметров бортовых систем, а также передачи управляющих воздействий, полученных в блоке реакции, на систему автоматического управления ВС.

4. Блок индикации и речевой модуль, предназначенные для взаимодействия с экипажем.

На данный момент техническое оснащение самолетов не подразумевает автономную работу системы управления без участия человека, особенно с пассажирами или дорогостоящим грузом на борту. Однако в критической ситуации, когда пилоты однозначно не могут взять на себя управление ВС, такая система окажется последним шансом избежать катастрофы.

Заключение

Можно отметить, что с развитием техники выросла надежность и точность авиационного оборудования, отказы аппаратуры стали происходить реже. На фоне повышения качества приборов катастрофы по вине пилотов заняли основной процент всех авиационных происшествий. Для предупреждения различных ситуаций, например, засыпание или ухудшение состояния пилота, посторонние в кабине, разгер-

метизация и т. п., рекомендовано применение интеллектуальной бортовой системы обеспечения безопасности полета ВС. Она в себя включает уже хорошо зарекомендовавшую себя в военной авиации БАСБП, модернизированную с помощью технологии компьютерного зрения для оценки ситуации во всей кабине и нейронной сети с глубоким обучением, способную анализировать происходящее, прогнозировать потенциально опасные ситуации и представлять пути их предотвращения.

Библиографический список

1. Industry High Level Group. Aviation Benefits 2017 – IHLG Report. URL: <https://www.icao.int/sustainability/Pages/IHLG.aspx> (дата обращения: 27.11.2020).
2. PlaneCrashInfo.com. Causes of Fatal Accidents by Decade. URL: <https://www.planecrashinfo.com/cause.htm> (дата обращения: 27.11.2020).
3. Ru.Wikipedia.org. 100 крупнейших авиационных катастроф. URL: <https://www.ru.wikipedia.org/s/wiki/> (дата обращения: 27.11.2020).
4. Michael Pines. Top 25 Causes of Car Accidents. URL: <https://seriousaccidents.com/legal-advice/top-causes-of-car-accidents/> (дата обращения: 29.11.2020).
5. Галчёнков Л. А., Меерзон Ю. М. Контроль состояния машиниста и алгоритм функционирования Системы телемеханической контроля бодрствования машиниста (ТСКБМ). М.: НЕЙРОКОМ, 2014. 3 с.
6. Наквасин А. Ю. Способ определения функционального состояния пилота и система для его осуществления. URL: <https://www.edrid.ru/rid/218.016.57ec.html> (дата обращения: 29.11.2020)/
7. Корпорация «Русские системы». Бортовая активная система безопасности полетов. URL: <https://www.rusys.ru/index.phtml-cid=5020156.htm> (дата обращения: 29.11.2020).
8. Амосов А., Плискин Н. 32-разрядный микроконтроллер 1986BE1T. Применение в бортовых автономных системах безопасности полета // Электроника НТБ. 2013. Вып. 6. С. 82–84.
9. Jungo. CoDriver for Car OEMs and Tier-1s. URL: <https://www.jungo.com/st/codriver-segments/codriver-driver-monitoring/> (дата обращения: 29.11.2020).
10. ОАО «Камов». Бортовая система автоматического возвращения вертолета. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU42024U1_20041120 (дата обращения: 29.11.2020).

УДК 519.216.3: 656.021.2

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-66-75

С. А. Андронов*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА В АНАЛИТИЧЕСКОЙ LOW-CODE-ПЛАТФОРМЕ LOGINOM

Рассмотрена задача разработки типового сценария прогнозирования трафика на улицах мегаполиса с помощью low-code-платформы Loginom, включающей в себя этап подготовки данных. В результате сравнения по основным применяемым критериям наилучшими оказались результаты у модели ARIMA для типового временного профиля скорости транспортного потока для будних дней на одной из улиц Санкт-Петербурга. Сравнительные характеристики моделей и результаты кросс-проверки представлены в тексте статьи.

Ключевые слова: скорость транспортного потока, модели прогнозирования, временные ряды, Loginom.

S. A. Andronov*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

COMPARISON OF THE QUALITY OF REGRESSION MODELS FOR SHORT-TERM FORECASTS OF TRAFFIC FLOW SPEED IN THE LOGINOM ANALYTICAL LOW-CODE PLATFORM

The problem of developing a typical scenario for predicting traffic on the streets of a megalopolis using the Loginom low-code platform, including the stage of data preparation, is considered. As a result of comparison according to the main applied criteria, the ARIMA model turned out to be the best for a typical time profile of traffic flow for weekdays on one of the streets of St. Petersburg. Comparative characteristics of the models and the results of cross-validation are presented in the text of the article.

Keywords: traffic speed, forecasting models, time series, Loginom.

Введение

Прогнозирование скорости транспортного потока (ТП) – важная составляющая при эксплуатации интеллектуальных транспортных систем, так как позволяет идентифицировать заторы и перегрузки, используется в системах динамической навигации, при получении информации перед поездкой и пр.

Фиксация скорости ТП требует установки большого количества транспортных детекторов, что влечет большие финансовые затраты. По этой причине компанией Yandex применяется подход получения информации от участников движения путем измерения их положения с использованием GPS-трекеров. Отсутствие таковых у всех участников движения приводит к искажениям данных о местоположении транс-

портных средств и, соответственно, к ошибкам вычисления скорости ТП.

Существуют несколько подходов к прогнозу скорости ТП. Среди них важное место занимают *непараметрические модели*. Примером является модель, основанная на методе «*k* ближайших соседей», где реализуется разбиение по ряду признаков на заданное число классов или, в данном случае, на ситуации встречающиеся в прошлом. Модель ищет в прошлом ситуацию, похожую на текущую, и в качестве прогноза определяет, как события развивались дальше. Основанная на этих принципах модель раз в сутки обучается. Прогноз, основанный на предыстории, сравнивается с последующим развитием событий. В модели подбираются коэффициенты, чтобы минимизировать расхождение между прогнозом и фактическими данными.

Другой применяемый подход – регрессионные модели. Математические формальные методы прогнозирования временных рядов, основанные на идее экстраполяции, исходят из предпосылки, что в краткосрочной перспективе существующая тенденция сохранится и в будущем. Предполагается конкретный вид функции в зависимости $V_{\text{будущая}} = F(V_{\text{прошлая}}, V_{\text{текущая}})$ и подбираются параметры в F . Часто используемая модель линейной векторной авторегрессии предполагает, что будущая скорость – это линейная комбинация нынешней и нескольких прошлых скоростей на нескольких участках: непосредственно на рассматриваемом, а также соседних с ним.

Вопросам прогнозирования скорости ТП уделялось внимание в работах многих авторов. Например, в исследовании [1] рассматривался метод построения прогнозов с использованием данных от GPS/GLONASS трекеров исходя из учета избыточности пространственно-временных данных. В предлагаемом методе для снижения размерности задачи используется метод главных компонент. Для каждого из подграфов дорожной сети формируется несколько элементарных прогнозов с использованием метода опорных векторов и метода потенциальных функций. Далее выполняется прогноз на основе векторной модели Бокса – Дженкинса [2]. Итоговый результат получался в виде линейной комбинации элементарных прогнозов, полученных различными методами с коэффициентами, определяемыми методом наименьших квадратов.

В работе [3] авторы для прогноза трафика используют данные транспортных детекторов, которые формируют взвешенный граф, где вес ребер находится в зависимости от расстояния между детекторами. Предполагается, что влияние между различными частями дороги уменьшается по мере увеличения расстояния между ними. Моделирование пространственно-временных зависимостей транспортных потоков в окрестности узлов графа осуществляется с помощью независимых рекуррентных и сверточных нейронных сетей. Рекуррентные сети отвечают за извлечение временных зависимостей из трафика, а сверточные – за извлечение пространственных. Обучение состоит из максимизации вероятности следующего значения временного ряда на основании истинного предыдущего значения. Во время предсказания реальные значения заменяются на предсказанные, что не дает нейронной сети учитывать накапливающийся шум во время тренировочной фазы.

Таким образом, резюмируя, по причине больших объемов транспортных данных, применя-

ются наиболее быстрые методы на основе алгоритмов машинного обучения. Если модель уже обучена, скорость обработки будет линейно зависеть от размерности данных. Исследование применения этих методов для прогнозирования трафика представляется актуальной задачей.

Постановка задачи

Алгоритмы и подходы к решению задачи прогнозирования трафика, как выше было отмечено, весьма разнообразны. В настоящей статье речь идет не об алгоритмах обработки и не каким способом получены исходные данные, а о применении для прогнозирования возможностей low-code-платформы с поддержкой обновляемого хранилища данных.

Задача состоит в разработке типового сценария прогноза скорости ТП для улицы города в среде низкого кода Loginom, включающего в себя этапы:

- предобработки данных;
- сравнения прогнозных моделей на ретроспективных данных по типовым критериям;
- выполнения прогнозирования с помощью наилучшей модели с расчетом ошибки прогноза.

Оценка точности прогнозирования должна быть выполнена путем кросс-проверки на данных из тестовой выборки. Сравнение качества прогноза выполняется в классе регрессионных моделей, таких как линейная авторегрессия, ARIMA и нейронная сеть.

Следует отметить, что в работе [4] в программе Statistica [6] исследовались точностные характеристики регрессионных моделей на различных горизонтах, включая классические методы сглаживания на примере прогнозирования пассажиропотока в аэропорту «Пулково». Однако для решения задачи прогноза трафика требуется ежедневная подкачка новых данных, что не обеспечивают стандартные статистические пакеты. При этом дискретность измерений скорости потока по времени должна быть не менее получаса, что требует применения системы с возможностью обновления данных в хранилище по расписанию.

Среда разработки

Универсальная среда разработки – платформа Loginom [5] ориентирована на решение широкого спектра задач анализа данных в различных областях. Особенностью ее является возможность создания прикладного программного обеспечения с помощью графических пользовательских

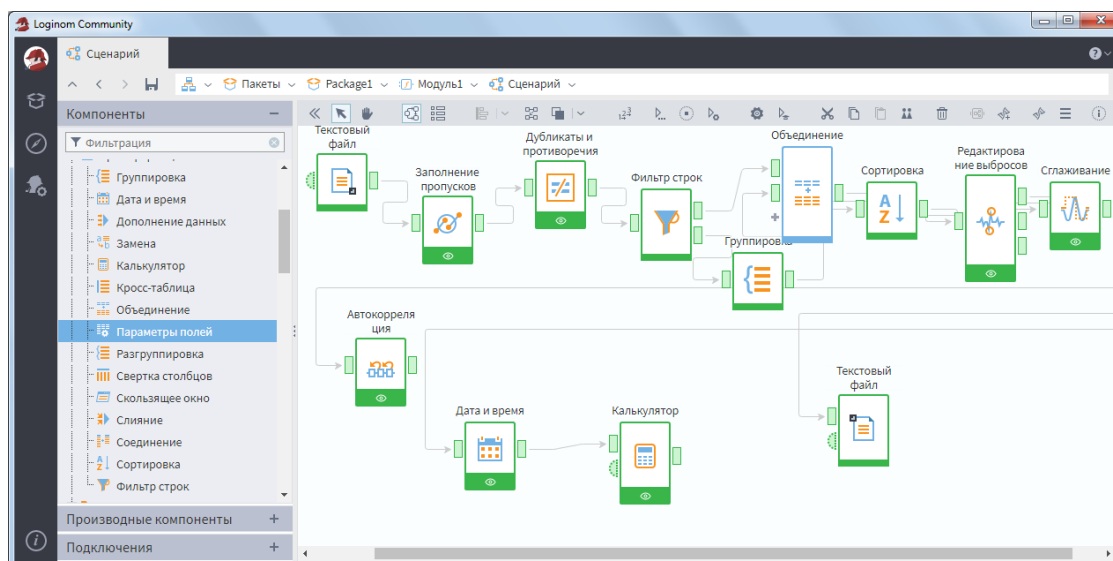


Рис. 1. Вид сценария для этапа предобработки

интерфейсов без программирования, используя визуальное проектирование. Среда разработки содержит весь спектр возможностей для реализации любой логики для конструирования алгоритмов обработки данных, что позволяет быстро модифицировать, улучшать и расширять систему обработки и анализа данных на уровне пользователя. веб-сервисами, так и базами данных и файловыми хранилищами данных. Интеграция с промышленными источниками данных: MS SQL, Oracle и т. д., веб-сервисами, файловыми хранилищами данных, возможность параллельной обработки нескольких ветвей сценария, наконец, встроенный язык Python и пр. делают Loginom весьма перспективным инструментом обработки данных. В данной статье применяется бесплатная десктопная версия Loginom Community (версия 6.4).

Регрессионные модели

К настоящему времени разработано множество моделей для решения задачи прогнозирования временных рядов, среди которых наибольшую применимость имеют статистические (регрессионные, авторегрессионные, скользящего среднего, модели экспоненциального сглаживания) и структурные, в частности, нейросетевые, где функциональная зависимость между будущими и фактическими значениями временного ряда, а также внешними факторами задана структурно. При прогнозировании временного ряда требуется определить модель прогнозирования, т. е. функциональную зависимость, адекватно описывающую временной ряд. Целью

при этом является нахождение модели, ошибка которой, например, средняя относительная, является наименьшей для времени упреждения. После того, как модель прогнозирования временного ряда определена, требуется вычислить будущие значения временного ряда, а также их доверительный интервал. В общем случае возможно применение комбинации элементарных прогнозов, что требует учитывать ряд условий: их непротиворечивость, перекрытие доверительных интервалов и т. д.

При прогнозировании скорости ТП интерес представляет краткосрочный прогноз на несколько шагов вперед. В данной работе рассматривается применение моделей линейной авторегрессии, ARIMA и нейросетевых.

Этап предобработки

Подготовка данных перед прогнозированием – важный этап в сценариях аналитических систем. В результате технических сбоев при регистрации данных могут появляться искажения в виде, например, противоречивых и (или) дублирующих друг друга данных. Для выявления дубликатов и противоречий, аномальных значений, заполнение пропусков, сглаживание шумов. Для наглядности задача разбивается на два этапа – подготовка, исследование данных и сравнение моделей с прогнозированием на основе наилучшей.

На рис. 1 показан вид сценария предобработки на рабочем поле программы.

Источником данных является файл с данными Кубинской улицы Санкт-Петербурга «буд-

ни март Кубинская.txt», содержащий пропуски по средней скорости ТП, требующие восстановления. Визуализатор *Статистика* показал, что всего таких пропусков – 12. Для исправления данных в данном случае был применен компонент из набора *Предобработка – Заполнение пропусков* и метод сплайн-интерполяции.

В процессе очистки данных целесообразно выполнить проверку на наличие дубликатов и противоречий. Для этого был использован компонент набора *Исследование – Дубликаты и противоречия*. В нашем случае целесообразно было искать дубликаты в записях по столбцу – *время* – входное поле (например, одно время могло быть записано более одного раза), а противоречия в столбце *скорость* – выходное поле. В результате в исходных данных были выявлены один дубликат и одно противоречие. В сценарии блок *Фильтрация строк* из набора *Транс-*

формация используется для того чтобы отфильтровать *Группу дубликатов* и после операции *группировка* по дубликату для показателей и отделения первого из дубликатов, ненужные элементы удаляются из набора. Аналогичная обработка происходит с противоречиями.

Перед выявлением выбросов следует предварительно изучить распределение данных, и к тем полям, в которых оно нормальное, проанализировать их, используя правило «3σ». Часто подтвердить или опровергнуть гипотезу о нормальности распределений можно, визуально проанализировав гистограмму значений. В сценарий был добавлен блок *Редактирование выбросов* из набора *Предобработка*, где найденные выбросы по скорости ТП заменяются наиболее вероятным значением.

Чтобы уменьшить накопление шумов при прогнозировании выполнялось сглаживание

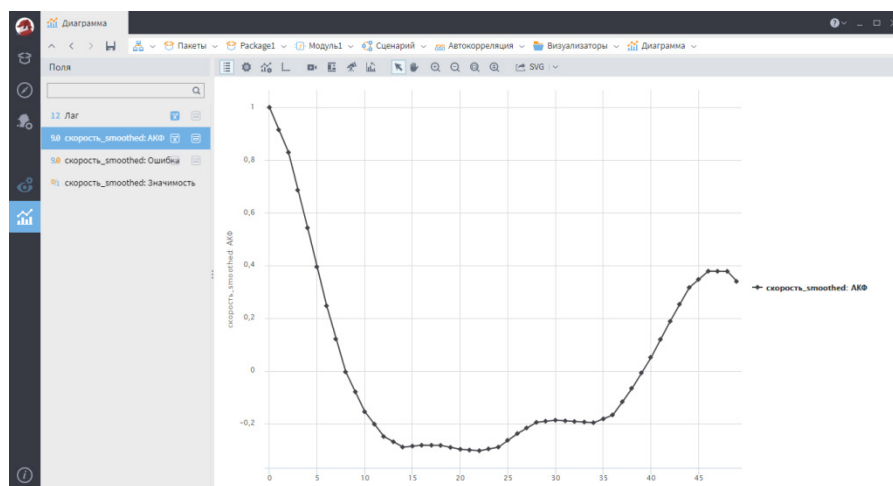


Рис. 2. Вид автокорреляционной функции

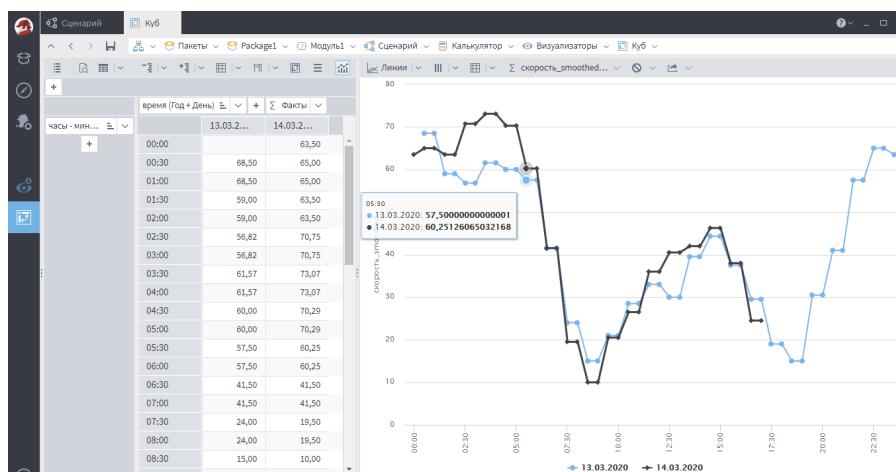


Рис. 3. Наложение профилей скорости транспортного потока для двух дней

скорости с помощью *Вейвлет-преобразования* с использованием вейвлета Дебеша с порядком 1 и глубиной разложения 1.

Для определения наличия сезонности был использован блок *Автокорреляция* из набора *Исследование*, где анализ выполнялся для сглаженной скорости. Поскольку имеем данные с шагом 30 мин, то достаточно было рассмотреть одни сутки, т. е. глубина погружения при обработке составляет 48 отсчетов. На рис. 2 показан вид корреляционной функции, в котором на 48-м отсчете наблюдается всплеск, т. е. имеется суточная сезонность, которую следует учитывать при прогнозировании.

Далее, для подтверждения типичности профилей было выполнено наложение двух будних дней, что можно наблюдать на рис. 3 в визуализаторе *Куб (OLAP – куб)*.

Видно, что профиль скорости транспортного потока в будние дни представляет собой типичную картину распределения скоростей движения по данной улице.

Сценарий может развиваться дальше, но в данном примере завершим этап предобработки экспортом результата в текстовый файл *Результат обработки.txt*.

Этап прогнозирования

Вид сценария данного этапа показан на рис. 4. Обработка начинается с импорта подго-

товленного выше файла *Результат обработки.txt* и файла фактических данных – *факт ср-чтв 17-30 3 отсч.txt* для кросс-проверки.

Для выбора лучшей модели прогнозирования рассматривались модели на основе машинного обучения: нейронная сеть, линейная авторегрессия, ARIMA.

Модель – нейронная сеть

В качестве первого варианта был рассмотрен универсальный аппроксиматор – нейронная сеть. Для его использования в сценарий был добавлен блок *Скользящее окно*. Учитывая наличие сезонности *глубина погружения* задана 48 отсчетов по полю *скорость*. По результатам обработки в блоке *Корреляционный анализ* из набора *Исследование* можно заключить что с полем *скорость* максимально положительно коррелируют (коэффициент Пирсона превышает 0,75) ретроспективные данные –48, –3, –2, –1. Таким образом, эти данные являются входными для блока *Нейросеть*, выходным прогнозируемым полем будет поле *скорость*.

Алгоритм построения нелинейной модели на основе искусственной нейросети сводится к определению архитектуры сети и запуска процесса обучения, позволяющего определить оптимальные значения весов сети. Исходная архитектура сети представляет собой входной слой из 4 входных сигналов, один скрытый слой из 2 нейронов и выходной слой. В настройке были установлены

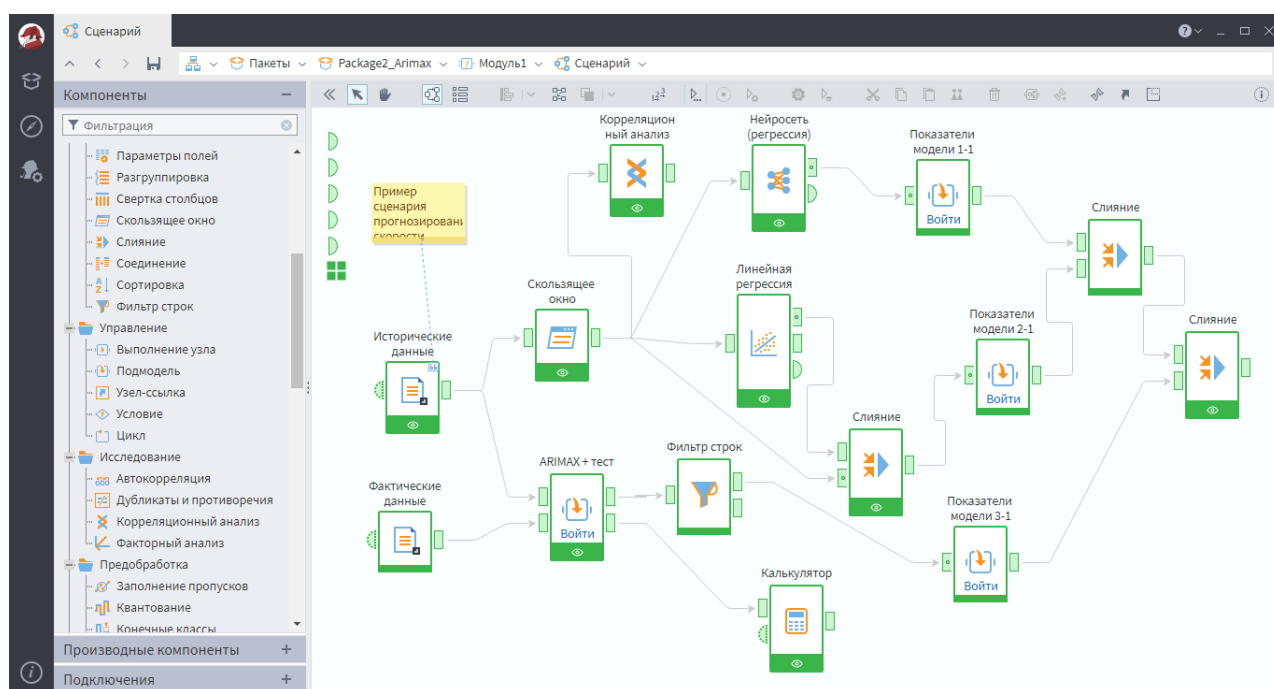


Рис. 4. Вид сценария для сравнения моделей и прогнозирования

признаки: автоматический подбор структуры, начиная с заданной и подбор степени регуляризации (параметр, отвечающий за производительность сети). Разбиение исходного набора данных на обучающее и тестовое подмножества было задано в пропорции 90 и 10% соответственно. Для нормализации входных полей было использовано масштабирование $[-1, 1]$. Условием прекращения обучения была установлена ошибка меньше 0,05 по достижению «эпохи» 1000.

Модель линейной регрессии.

Для интервалов прогнозов на 1–3 отсчета, т. е. как в нашем случае, эффективными могут оказаться линейные авторегрессионные модели, которые, однако, вблизи сезонных пиков работают плохо. В основу этих моделей (AR(p)-процесс) заложено предположение о том, что значение прогноза процесса линейно зависит от некоторого количества предыдущих значений того же процесса. Данная модель имеет вид

$$\hat{y}_t = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i y_{t-i} + \varepsilon_t,$$

где \hat{y}_t – прогноз в момент времени t ; y_{t-i} – исторические данные; ε_t – случайная составляющая (белый шум); a_i – коэффициенты авторегрессии.

Как вариант модели прогнозирования параллельно с нейросетью включим блок модели *Линейная регрессия*. В результате корреляционного анализа было выявлено, что наибольшим весом на интервале прогнозирования для рассматриваемой модели имеют три предшествующих прогнозу отсчета, поэтому они использовались в качестве входных данных для настройки модели. Разбиение на обучающее и тестовое множество такое же, как и для нейросети.

Для объединения на одном графике рядов *скорость* и *скорость регрессия* добавлен блок *Слияние* таблиц. Результирующая модель с найденными коэффициентами имеет вид

$$\hat{y}_t = 3,52 + 1,19y_{t-1} + 0,11y_{t-2} - 0,35y_{t-3} + \varepsilon_t.$$

Рассмотрим задачу прогнозирования на будущее (на 3 отсчета по 30 мин) с помощью блока ARIMAX. Модель авторегрессии (AR) проинтегрированного скользящего среднего (МА) – АРПСС или AutoRegressive Integrated Moving Average (ARIMA). Модель AR относится к категории стационарных моделей, которые описывают процессы, для которых математическое ожидание и дисперсия являются константами. Однако, поскольку нестационарность часто присутствует, как в нашем случае, такая модель не может быть адекватной.

Стационарной может быть некоторая разность наблюдаемого процесса [2]. Вводится оператор Δ^d разности порядка d . В частности, $\Delta X_t = X_{t-1} - X_t$ оператор разности временного порядка 1; $\Delta^2 X_t = \Delta^2 X_{t-1} - \Delta X_t$ – оператор разности 2-го порядка и т. д. Формальная запись модели ARIMA (p, d, q) имеет вид

$$\Delta^d X_t = c + \sum_{i=1}^p a_i \Delta^d X_{t-i} + \sum_{j=1}^q b_j \Delta^d \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t,$$

где ε_t – стационарный временной ряд; c, a_i, b_j – параметры модели.

Таким образом, модель ARIMA позволяет с приемлемым качеством прогнозировать как стационарные временные ряды, так и нестационарные, временные ряды с трендом, а также при небольшой модификации и ряды с сезонной компонентой (SARIMA). Расширением модели является учет внешних данных (ARIMAX), которые могут быть той же структуры или данными вообще из другого источника.

Рассмотрим блок – подмодель «ARIMAX + тест». Данное название отражает тот факт, что различные исходные данные могут потребовать изменения настроек блока. На вход подмодели подаются исторические данные – файл *Результат обработки.txt*, созданный ранее и фактические данные – файл *факт ср-чтв 17-30 3 отсч.txt*.

Заметим, что здесь понятие *Подмодель* – по сути подпрограмма в традиционном понимании. В свою очередь, подмодель может включать в себя другие подмодели, в целом представляя собой комплекс алгоритмов обработки данных. Вид сценария подмодели показан на рис. 5.

При настройке данного блока задано, что структура модели определяется автоматически. Также указано, что должен быть сделан расчет доверительного интервала прогноза с вероятностью 95%, горизонт прогноза равен 3. В результате были определены, что порядок интегрирования равен 0. В результате расчета были получены коэффициенты модели, которые можем включить в аналитическое представление модели ARIMA (5, 0, 4):

$$\begin{aligned} \hat{y}_t = & 3,35 + 1,01y_{t-1} + 0,41y_{t-2} - 0,05y_{t-3} - \\ & - 0,81y_{t-4} + 0,38y_{t-5} + 0,6e_{t-1} + 0,45e_{t-2} - \\ & - 0,68e_{t-3} + 1,16e_{t-4} + e_t. \end{aligned}$$

Сравнение моделей прогноза

При прогнозировании моделью ARIMA не требовалось применять *Скользящее окно* и

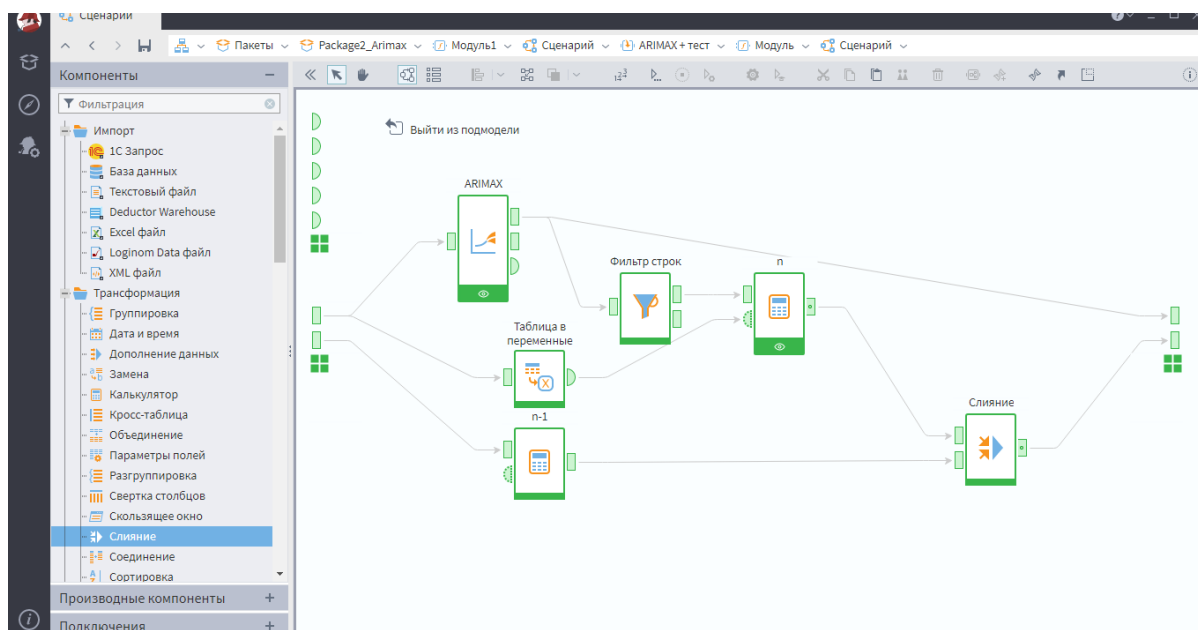


Рис. 5. Вид сценария подмодели для ARIMAX

поэтому неполные записи на выборке ограниченного объема отсутствовали. Для корректного сравнения с другими моделями был ограничен набор выходных данных этой модели интервалом с помощью блока *Фильтрация строк*.

Далее, выходы всех моделей с фактическими данными направляются на соответствующие блоки сравнения, представляющие из себя подмодели, внутреннее строение которых показано на рис. 6.

Формулы расчета показателей ошибок сведены в таблицу. Реализация этих формул здесь не рассматривается.

Примечание: $e_t = y_t - y_t^{sim}$ – модельная погрешность (модельный остаток), где y_t – фактическое значение показателя на момент времени t ; t – момент времени; y_t^{sim} – значение показате-

ля, полученное с помощью модели на t -й момент времени; n – число ретроспективных данных.

Окончательная картина после слияния показателей в визуализаторе *Куб* выглядит, как показано на рис. 7.

Видно, что модель прогнозирования с помощью нейросети (модель 1) и ARIMAX (модель 3) показали достаточно высокие результаты. Так, в модели ARIMAX ошибка MAPE = 10,4% оказалась чуть хуже, чем в нейросетевой модели, но у нее лидерство по остальным показателям.

Динамика скорости, ее прогноза и ошибки аппроксимации показаны на рис. 8.

Оценка точности прогнозирования выполняется путем кросс-проверки с помощью данных из тестовой выборки. На выходе из подмодели ARIMAX применен блок *Калькулятор*, где вы-

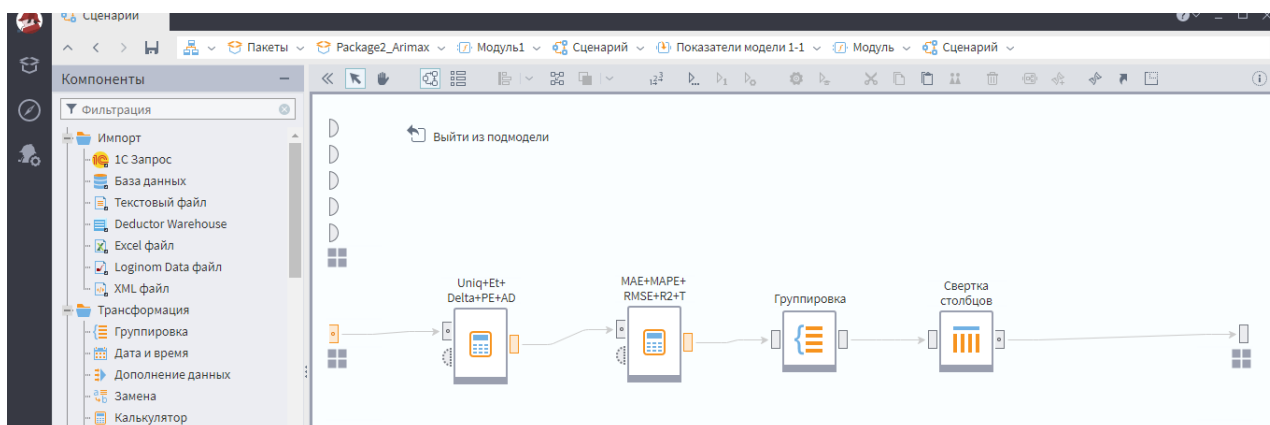
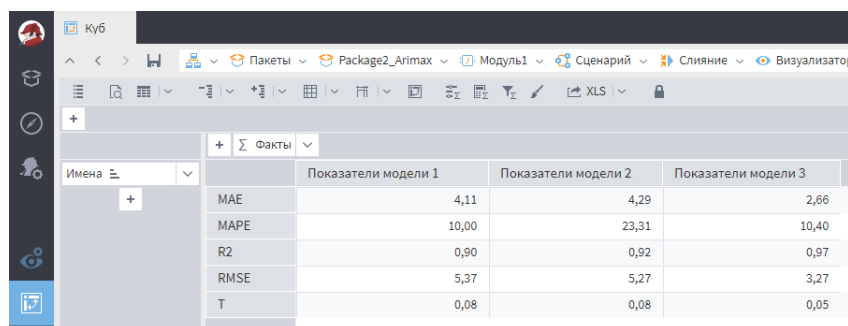


Рис. 6. Вид сценария подмодели расчета ошибок

Основные оценочные характеристики качества прогнозной модели

Название	Формула	Смысл ошибок
Средняя абсолютная ошибка	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_t $	Показывает, насколько точен прогноз. Робастная и симметричная ошибка
Средняя относительная ошибка или (средний абсолютный процент)	$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ e_t }{y_t} \times 100\%$	Показывает, насколько велики ошибки в сравнении со значениями ряда
Среднеквадратическое отклонение	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_t^2}{n-1}}$	Показывает отклонение в масштабе показателя. Позволяет выявить большие отклонения прогноза от фактических данных
Коэффициент детерминации	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_t - y_t^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_t - \bar{y}_t)^2}$	Характеризует степень сходства исходных данных и предсказанных
Коэффициент несоответствия Тейла	$T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_t - y_t^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n y_t^2 + \sum_{i=1}^n y_t^{sim\ 2}}}$	Показывает степень схожести временных рядов



Имена	Показатели модели 1	Показатели модели 2	Показатели модели 3
MAE	4,11	4,29	2,66
MAPE	10,00	23,31	10,40
R2	0,90	0,92	0,97
RMSE	5,37	5,27	3,27
T	0,08	0,08	0,05

Рис. 7. Показатели качества прогнозирования

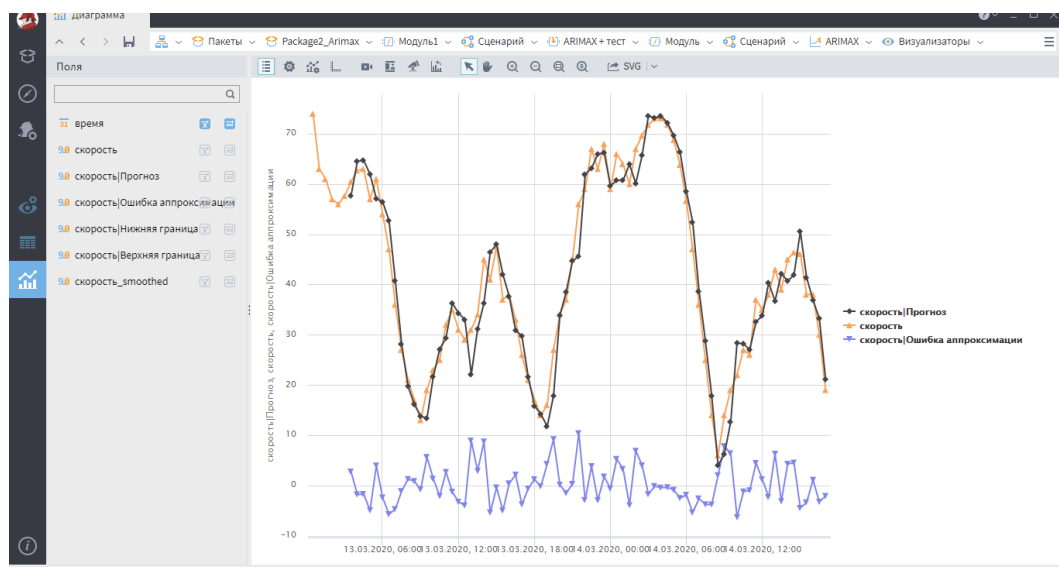


Рис. 8. Вид прогноз и остатков по модели ARIMAX

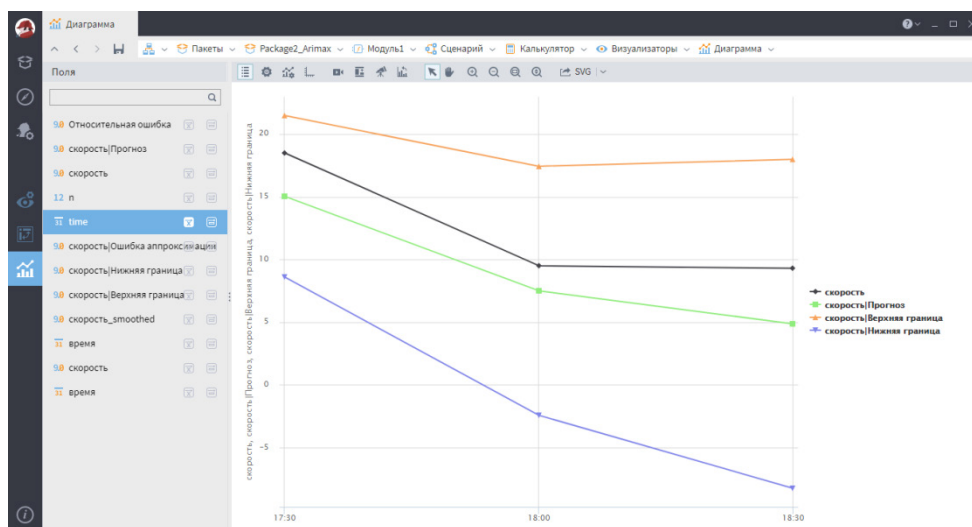


Рис. 9. Профили прогноза и факта на периоде упреждения

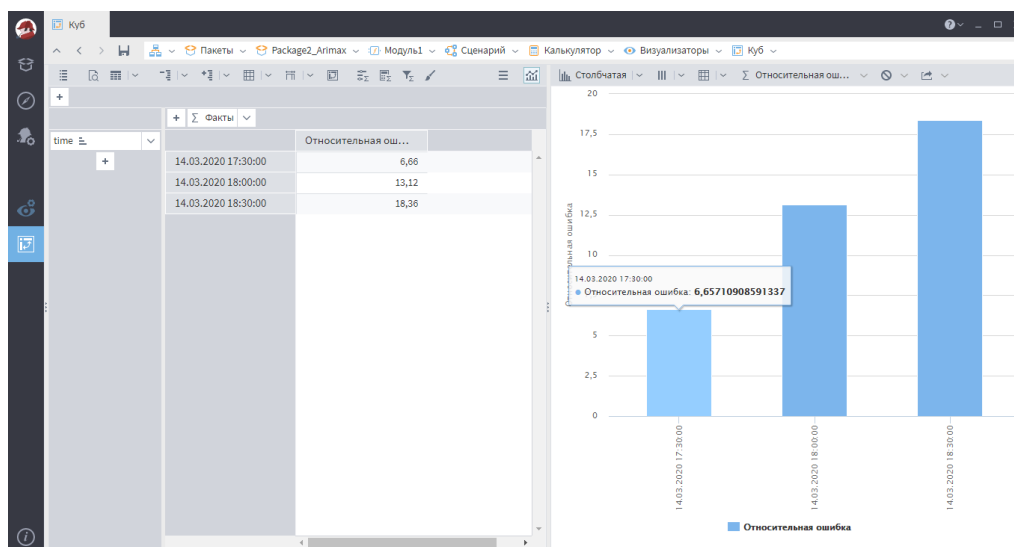


Рис. 10. Ошибка прогноза по модели ARIMA на кросс-проверке

числяется отклонение прогноза и фактических данных в процентах, загружаемых на вход сценария. В данном случае ошибка вычисляется следующим образом:

$$\delta_t = \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| 100\%,$$

где \hat{y}_t , y_t – прогнозные и фактические значения соответственно.

На рис. 9 приведен профиль результатов прогноза в доверительном интервале с вероятностью 95% на горизонте 3 отсчета в диапазоне с 17-30 до 18.30 с шагом 30 мин.

Ошибка прогноза модели ARIMA при сравнении с фактическими данными по временным интервалам представлена на рис. 10.

Заключение

В настоящей статье приведен пример построения сценария, включающий этапы предобработки данных, сравнения ряда моделей прогноза, выбора лучшей модели и прогнозирования на ее основе. Ошибка ARIMA – модели на кросс-проверке на первые полчаса не превышала 7%.

Статистическая информация о состоянии ТП на улицах города должна накапливаться в информационном центре управления движением. На основе анализа фактических диаграмм скорости ТП, полученных либо от датчиков трафика, либо в результате обработки GPS/GLONASS – треков на проблемных сегментах и улицах мегаполиса при различных условиях движения

(дата, время суток, метеоусловия, будни/выходные и пр.) могут быть построены прогнозные модели различной степени срочности.

Для этой цели предлагается применить аналитическую low-code-платформу Loginom, обеспечивающую возможность в автоматическом режиме ежедневное обновление исторических данных в хранилище по скоростям ТП на участках города, выполнение подготовленных сценариев по расписанию в пакетном режиме. В момент принятия решения будет происходить обращение к серверу, который «прогоняет» новые данные через построенные сценарии и выдает ответ. Возможность гибкого изменения параметров сценариев, существующая в Loginom, позволяет формировать новые или использовать построенные модели прогнозирования. В этой связи потребуется разработка комплекса сценариев для генерации моделей прогноза скоростей ТП по улицам города, времени суток, времени года и с учетом сезонного фактора и в дальнейшем регулярного контроля качества моделей и уточнения сценариев.

Библиографический список

1. Агафонов А. А., Мясников В. В. Оценка и прогнозирование параметров транспортных потоков // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 3. С. 539–549.
2. Бокс Дж., Дженкинс Г. М. Анализ временных рядов, прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 406 с.
3. Прокопцев Н. Г., Алексеев А. Е., Холодов Я. А. Использование сверточных нейронных сетей для прогнозирования скоростей транспортного потока на дорожном графе // Компьютерные исследования и моделирование. 2018 Т. 10, № 3. С. 359–367.
4. Андронов С. А. Определение наилучших моделей прогнозирования пассажиропотоков в аэропорту Пулково в условиях нормальной работы и кризиса // Системный анализ и логистика. 2020. № 2 (24). С. 13–29.
5. Аналитическая платформа Loginom. URL: <https://loginom.ru> (дата обращения: 01.12.2020).
6. Statsoft. URL: <http://statsoft.ru/> (дата обращения: 02.04.2020).

УДК 656.025.4

К. М. Бутомо*

магистрант

С. В. Уголков*

кандидат военных наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ

Рассматривается реформа системы обращения с твердыми коммунальными отходами в России на современном этапе. Освещена государственная политика РФ в данной сфере. Изучены действующие законодательные акты, на основании которых уточняется терминология и порядок обращения с отходами. На примере Ленинградской области показана специфика обращения с твердыми коммунальными отходами на региональном уровне.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, реформа обращения с отходами, накопление отходов, транспортировка отходов, утилизация отходов, сортировка отходов, переработка отходов.

K. M. Butomo*

Postgraduate Student

S. V. Ugolkov*

PhD, Military, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF THE MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT

This article is dedicated to the reform of the municipal solid waste management system in Russian on modern-day. The author gives information about the Russian state politics in this sphere. He analyzes the terms and regulations of the municipal solid-waste on the current legislative documents-based. Using the example of the Leningrad region, the author discusses the specificity of municipal solid waste management in this area.

Keywords: municipal solid waste, waste reform, waste accumulation, waste transportation, waste utilization, waste sorting, recycling of wastes.

Введение

Обращение с отходами является одной из самых насущных проблем современной цивилизации. Так, в данных, опубликованных Всемирным банком, содержатся сведения о ежегодном образовании на нашей планете около 2 млрд т отходов. Прогнозируется, что к 2050 г. это количество вырастет почти до 3,5 млрд т [1]. В России данный показатель также растет. Суммарный ежегодный объем отходов в нашей стране – 70 млн т. При этом только 5% идет в переработку. Остальные 95% отходов вывозят на полигоны и свалки. Для этой цели выделяются большие участки земли, что, в свою очередь, наносит огромный ущерб экологии, а в конечном итоге – здоровью и жизнедеятельности людей. Ежегодные потери экономики из-за отсутствия четкой системы обращения с отходами специалисты оценивают в 232,8 млрд руб. [2].

Однако в последние 5 лет ситуация в России меняется. В 2014 г. началась подготовка к ре-

формированию системы управления отходами, а с 2019 г. в большинстве регионов РФ реформа вступила в силу. Согласно планам, к 2030 г. количество переработанных отходов в стране может вырасти до 97%, а утилизированных – до 86%. Серьезные изменения на федеральном уровне привели к уточнению терминологии, появлению новых законодательных актов. На региональном уровне вносятся определенные корректировки в систему обращения с отходами, с учетом особенностей и специфических отличий в разных субъектах РФ.

До 2019 г. в РФ мусор, который образуется в быту физическими лицами, обозначался термином «твердые бытовые отходы» (ТБО). С 2019 г. понятие ТБО отменено и может применяться исключительно в разговорной речи. В правоустанавливающих документах и иной официальной документации применяется термин «твердые коммунальные отходы» (ТКО). К ТКО относятся такие отходы, которые возникают в резуль-

тате обычной бытовой жизнедеятельности людей. Виды отходов, относящихся к ТБО: органические и неорганические (4 5 класса опасности). Классификация ТБО включает такие характеристики как агрегатное состояние отходов, их состав, принадлежность к классу опасности и т. д.

Законодательно все виды ТБО до обновления были перечислены в Федеральном классификационном каталоге отходов (ФККО). В ФККО были указаны источники возникновения таких отходов: жилые помещения, придомовая территория и пр. В исключение попадают крупногабаритные (в том числе строительные) и опасные отходы – для них предусмотрены иные условия по обращению.

В соответствии со ст. 1 ФЗ № 89 [3], «твердыми коммунальными отходами называются отходы, образующиеся в процессе потребления в жилых помещениях, а также отходы, образующиеся в офисах организаций и на предприятиях в результате жизнедеятельности сотрудников». ТБО образуются в условиях домашней работы: например, в процессе приготовления пищи, уборки квартиры, небольших ремонтных работ, сломанных вещей, мебели и пр. В отличие от ТБО, понятие ТКО более широкое, потому что объединяет бытовые отходы как физических, так и юридических лиц.

Согласно приказу Росприроднадзора № 242, ТКО присвоен код 7 30 000 00 00 0. Полный список ТКО изложен в последней редакции ФККО [4]. К группе отходов ТКО принадлежат:

- отходы из помещений жилого фонда;
- мусор от уборки на территориях населенных пунктов, относящийся к ТКО;
- растительный мусор, образующийся после уборки сквера, газона, цветника на территории поселений;
- мусор из бытовых и офисных помещений организаций, предприятий;
- мусор, образующийся в процессе уборки зданий вокзалов, морских и аэропортов, станций метро и т. п.;
- ТКО из мест временного проживания (таких как отели), а также из мест расположения социальных объектов (банк, почта).
- отходы, образованные в ходе предоставления услуг образования, торговли, развлечений и т. д.

На рис. 1 приведены примеры отходов, относящихся и не относящихся к ТКО.

Помимо уже упомянутого ФЗ № 89 [3], порядок обращения с ТКО регламентируется следующими законодательными актами: Федеральными законами № 52-ФЗ [5], № 174-ФЗ [6], № 7-ФЗ [7], № 483-ФЗ [8], постановлениями Правительства [9–15] и Указом Президента [16].

Реформа в сфере обращения с ТКО

Реформа в сфере обращения с ТКО в России – это комплекс мероприятий по разработке, созданию и реализации новой системы комплексного обращения с отходами. Эта деятельность реализуется Федеральным Правительством и руководством субъектов РФ.

В соответствии с принятым законодательством (ФЗ № 89) [3], органом исполнительной власти каждого субъекта РФ подготавливается, разрабатывается и утверждается так называемая «Территориальная схема обращения с ТКО» – подробная схема системы по организации сбора ТКО, их транспортировки, а также утилизации, обработки, обезвреживания и захоронения на территории региона за установленный период времени.

В «Основах государственной политики в области экологического развития России до 2030 года» [17] предполагается отдельный сбор ТКО, определена ответственность за несанкционированную утилизацию, постепенное введение запрета на захоронение ТКО, подлежащих вторичной переработке.

Реформа призвана создать новую эффективную систему обращения с ТКО – без «теневых перевозчиков» и произвольных тарифов на услугу вывоза мусора и создать условия для перехода от повсеместного захоронения ТКО к их переработке. Реализовать осуществление контроля на всех этапах обращения с ТКО и ликвидировать образование незаконных свалок – для этой цели все транспортные средства для перевозки мусора необходимо оснастить датчиками системы ГЛОНАСС.

Региональный оператор обращения с ТКО

Наряду с введением нового термина, в ходе реформы обращения с ТКО появился новый и ключевой участник системы – региональный

ОТНОСИТСЯ К ТКО		НЕ ОТНОСИТСЯ К ТКО	
	ПИЩЕВЫЕ ОТХОДЫ		ГОРЯЧИЕ ОТХОДЫ
	ТАРА И УПАКОВКА		СНЕГ И ЛЁД
	ПАКЕТЫ И СМЁТ		РТУТЬСОДЕРЖАЩИЕ ЛАМПЫ
	СТАРАЯ МЕБЕЛЬ		БАТАРЕИ И АККУМУЛЯТОРЫ
	БЫТОВАЯ ТЕХНИКА		СТРОИТЕЛЬНЫЙ МУСОР
	ЭЛЕКТРОПРИБОРЫ		ОТХОДЫ ЖИВОТНОВОДСТВА

Рис. 1. Отходы, относящиеся и не относящиеся к категории ТКО

оператор (РО). Выбирается РО на 10 лет по результатам объявляемого открытого конкурса [3]. Конкурс проводит в каждом регионе орган исполнительной власти данного субъекта Российской Федерации [14]. РО может стать юридическое лицо с любой организационно-правовой формой, которое имеет регистрацию в РФ; а также действующую лицензию на осуществление деятельности по обращению с ТКО. Лицензия должна в обязательном порядке включать разрешение на сбор, обработку, транспортировку, размещение, обезвреживание, утилизацию отходов 1–4 классов опасности.

По результатам конкурса назначается дата начала деятельности РО и до этой даты все собственники ТКО должны подписать с РО договор. Собственниками ТКО закон называет владельцев помещений в МКД (многоквартирных домах), собственников-домовладельцев. К категории собственников ТКО также относятся юридические лица и ИП (индивидуальные предприниматели). Владельцы помещений в МКД, хозяева частных домовладений могут делегировать полномочия своим управляющим компаниям (УК, ТСЖ и пр.).

Ответственность за дальнейшие действия по отношению к ТКО возникает у РО после их погрузки в транспортное средство в установленных местах сбора.

В большинстве регионов Российской Федерации к началу 2019 г. реформа вступила в силу. Как показывает практика, сложностей возникло немало, но в целом новая система оказалась работоспособной.

Так, в ходе проведения реформы Ленинградская область добилась определенных успехов. Правительство региона провело открытый конкурс, результатом которого был избран региональный оператор. На сегодняшний день – это акционерное общество (АО) «Управляющая компания по обращению с отходами в Ленинградской области». Сейчас в Ленобласти разработана территориальная схема обращения с ТКО [18]. Документ является базовым для всех участников процесса обращения с ТКО. В нем учтено количество ТКО, источники образования, места накопления отходов, отражена схема потоков ТКО до мест складирования, детализация видов отходов, способы обработки и утилизации, прочие параметры.

В ходе реформы постоянно уточняется количество генерируемого в Ленинградской области мусора, места его накопления. По имеющимся оценкам, суммарный объем мощностей всех полигонов для ТКО в Ленинградской области позволит разместить 6 млн т отходов. Этого хва-

тит на 2,5 года. Появляются новые станции сортировки – так, за 2019 г. их число выросло с 6 до 13. Согласно Территориальной схеме, в 2020 г. доля переработанных ТКО достигнет 3%, а к 2024 г. – 8%. Планы на сортировку еще более внушительные. За 2019 г. это 5–7%, а на 2020 г. был запланирован двукратный рост. К 2024 г. планируется более 40%, а это более миллиона тонн мусора. В Гатчинском районе спроектировано строительство экотехнопарка «Селект Энерджи», мощности которого позволят перерабатывать все ТКО, образованные на юге Санкт-Петербурга и области, а также поможет рекультивировать полигон для мусора «Новый Свет Эко». Продолжается работа по установке современных контейнерных площадок, которых в данный момент не хватает.

Транспортные компании (ТК), с которыми РО заключил договор на вывоз мусора с территории Ленобласти, на все ТС установили систему ГЛОНАСС, благодаря чему вывоз ТКО полностью контролируется. Данные ТС сегодня следуют строго по указанному маршруту и не имеют возможности выбрасывать ТКО в ненадлежащих местах. Это помогает бороться с незаконными свалками.

Москва, Санкт-Петербург, Севастополь имеют возможность продолжения подготовки к реформе до 2022 г. [8].

Проблема обращения ТКО в Ленинградской области

В связи с полученной Санкт-Петербургом отсрочки для реализации реформы, серьезные трудности в осуществлении изменений обращения с ТКО возникли в Ленинградской области. По различным оценкам специалистов, Ленинградская область производит 711 тысяч т ТКО ежегодно. Около 2 млн т в год вывозится в данный регион из Санкт-Петербурга. В соответствии с законодательством, в городе нельзя размещать полигоны для ТКО. Ранее руководство Санкт-Петербурга заявляло о планах по строительству мусороперерабатывающих заводов в черте города, но к реализации этих планов на сегодняшний день так и не приступали. Также до сих пор в Санкт-Петербурге не разработана Территориальная схема обращения с ТКО (представленный в 2020 г. вариант не выдерживает никакой критики), РО в городе тоже не выбран.

В то же время Ленинградская область, начиная реформу, готовилась к взаимодействию с Санкт-Петербургом, планировала логистические решения и создание необходимой инфраструктуры с учетом общих нужд как города,

так и области. В настоящее время руководство Ленобласти предложило создать единого РО для двух субъектов. Соглашение подписано губернаторами области и города. В соглашении предусмотрено пять важнейших пунктов:

1) Санкт-Петербург должен предоставить уточненные и реальные объемы накопления ТКО;

2) все мусоровозы, выезжающие за границы города, необходимо оборудовать системой ГЛОНАСС;

3) полигоны, куда вывозятся петербургские отходы, необходимо внести в единый реестр Ленинградской области. Соглашения должны быть заключены между полигоном, РО и перевозчиком;

4) полигоны, на которые из Санкт-Петербурга вывозятся ТКО, должны быть оснащены глубокой сортировкой мусора;

5) Санкт-Петербург должен разработать и предоставить программу строительства мусороперерабатывающих и прочих систем утилизации ТКО на территории города. В противном случае, с 2021 г. Ленинградская область не будет принимать ТКО от города.

Заключение

Обращение с ТКО на современном этапе в России претерпевает значительные изменения. С 2019 г. в субъектах РФ началась реформа всей системы обращения с ТКО. Понятие ТКО заменило термин ТБО, что позволило включить в число собственников таких отходов юридические лица. Вступили в силу новые законодательные акты, принятые на федеральном уровне. На региональном уровне в большинстве субъектов Федерации разработаны и утверждены территориальные схемы обращения с ТКО – подробная схема устанавливаемой системы организации сбора, транспортировки, утилизации, обработки, обезвреживания и захоронения ТКО на территории региона за определенный период времени. В регионах также выбраны Региональные операторы – новые и ключевые участники системы обращения с ТКО.

В связи с полученной Санкт-Петербургом отсрочки для реализации реформы, серьезные трудности возникли в Ленинградской области. Около 70% ТКО ввозится на территорию области из Санкт-Петербурга, где до сих пор не принято шагов для реформирования сложившейся практики обращения с отходами. В настоящее время между двумя субъектами подписано соглашение о создании единого регионального оператора. Дальнейшее развитие и усовер-

шенствование системы обращения с ТКО в данном регионе во многом зависит от результатов такого сотрудничества.

Библиографический список

1. WhataWaste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. URL: <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/> (дата обращения: 01.12.2020).

2. Мировой опыт: шесть примеров эффективной работы с отходами. URL: <https://strelkamag.com/ru/article/mirovoi-opyt-shest-primerov-effektivnoi-raboty-s-otkhodami/> (дата обращения: 01.12.2020).

3. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» (ред. от 14 июня 2020 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/901711591> (дата обращения: 01.12.2020).

4. Приказ Федеральной службы по надзору в сфере природопользования. 22 мая 2017 года № 242 «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов» (с изм. на 2 ноября 2018 года). URL: <http://docs.cntd.ru/document/542600531> (дата обращения: 01.12.2020).

5. Федеральный закон от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ (с изм. на 13.07.2020) «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения». URL: <http://docs.cntd.ru/document/901729631> (дата обращения: 01.12.2020).

6. Федеральный закон от 23.11.1995 г. № 174-ФЗ (с изм. на 31 июля 2020 г.) «Об экологической экспертизе». URL: <http://docs.cntd.ru/document/901729631> (дата обращения: 01.12.2020).

7. Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ (с изм. на 31 июля 2020 г.) «Об охране окружающей среды». URL: <http://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения: 01.12.2020).

8. Федеральный закон от 25.12.2018 г. № 483-ФЗ «О внесении изменений в статью 29.1 Федерального закона «Об отходах производства и потребления». URL: <http://docs.cntd.ru/document/556184854> (дата обращения: 01.12.2020).

9. Постановление Правительства РФ от 04.04.2016 г. № 269 (с изм. на 15.09.2018) «Об определении нормативов накопления твердых коммунальных отходов». URL: <http://docs.cntd.ru/document/420346598> (дата обращения: 01.12.2020).

10. Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 326 (с изм. на 29.03.2019) «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды». URL: <http://docs.cntd.ru/document/499091755> (дата обращения: 01.12.2020).

11. Постановление Правительства РФ от 16.05.2016 г. № 424 (ред. от 12.07.2018) «Об утвержде-

дении порядка разработки, утверждения и корректировки инвестиционных и производственных программ в области обращения с твердыми коммунальными отходами, в том числе порядка определения плановых и фактических значений показателей эффективности объектов обработки, обезвреживания, захоронения твердых коммунальных отходов, а также осуществления контроля за реализацией инвестиционных и производственных программ». URL: <http://docs.cntd.ru/document/420355213> (дата обращения: 01.12.2020).

12. Постановление Правительства РФ от 30.05.2016 № 484 (ред. от 13.09.2020) «О ценообразовании в области обращения с твердыми коммунальными отходами». URL: <http://docs.cntd.ru/document/420357737> (дата обращения: 01.12.2020).

13. Постановление Правительства РФ от 03.06.2016 № 505 (с изм. от 15.09.2018) «Об утверждении правил коммерческого учета объема и (или) массы твердых коммунальных отходов». URL: <http://docs.cntd.ru/document/420358237> (дата обращения: 01.12.2020).

14. Постановление Правительства РФ от 05.09.2016 № 881 (ред. от 15.09.2018) «О проведении уполномоченными органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации конкурсного отбора региональных операторов по обращению с твер-

дыми коммунальными отходами». URL: <https://base.garant.ru/71483832/> (дата обращения: 01.12.2020).

15. Постановление Правительства РФ от 12.11.2016 г. № 1156 (ред. от 15.12.2018) «Об обращении с твердыми коммунальными отходами и внесении изменения в постановление правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 г. № 641». URL: <http://docs.cntd.ru/document/420382731> (дата обращения: 01.12.2020).

16. Указ Президента Российской Федерации № 8 от 14 января 2019 г. «О создании публично-правовой компании по формированию комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами «Российский экологический оператор». URL: <http://docs.cntd.ru/document/552096895> (дата обращения: 01.12.2020).

17. Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года (утв. Президентом РФ от 30 апреля 2012 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902369004> (дата обращения: 01.12.2020).

18. Территориальная схема обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами утверждена приказом управления Ленинградской области по организации и контролю деятельности по обращению с отходами от 22 июля 2019 г. № 5. URL: <https://waste.lenobl.ru/deiatelnost/tershema/> (дата обращения: 01.12.2020).

УДК 621.3-1/-9

Д. А. Ветрова*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОТУРБИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Рассмотрено применение газотурбинного оборудования на газодобывающих месторождениях Ямало-Ненецкого автономного округа. Приведено описание основных промышленных зон, рассмотрено новое Северо-Обское месторождение и добыча газа на нем при помощи ледостойких платформ с газотурбинными установками.

Ключевые слова: газ, месторождение, электроэнергия, газотурбинные установки, добыча.

D. A. Vetrova*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

APPLICATION OF GAS TURBINE EQUIPMENT IN GAS PRODUCTION FIELDS

The article discusses the use of gas turbine equipment in the gas fields of the Yamal-Nenets Autonomous district. A description of the main industrial zones is given, a new Severo-Obskoye field and gas production from it using ice-resistant platforms with gas turbine units are considered.

Keywords: gas, field, electricity, gas turbine units, production.

В настоящее время спрос на газ постоянно возрастает, поскольку он является чистым экологическим топливом и эффективным энергетическим ресурсом. Природный газ играет важную роль в жизнеобеспечении населения и, конечно же, в экономике страны. На территорию Российской Федерации приходится около трети от всех известных на данный момент запасов газа. По данным Министерства финансов РФ в 2020 г. более 4 782,2 млрд рублей по статье доходов принесли нефтегазовые месторождения, из которых более 440 млрд рублей – газ [1].

Основные запасы газа в нашей стране располагаются на территории Западной Сибири. В северной части Западной Сибири, а именно в Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком округах, добывают более 90% всего природного газа.

Полуостров Ямал является стратегическим нефтегазоносным регионом России. Предварительно оцененные запасы газа здесь превышают 16,6 трлн м³. Это составляет около двух третей запасов газа в Западно-Сибирском нефтегазовом бассейне [2].

На территории Ямала располагается более 30 месторождений. Основными промышленными зонами добычи газа являются Бованенковская, Тамбейская и Южная.

Бованенковская промышленная зона включает в себя Бованенковское, Харасавэйское и

Круженштернское месторождения с суммарной добычей газа более 217 млрд в год [3].

Тамбейская промышленная зона обладает ресурсной базой более 800 млрд газа, на ее территории находятся Северо-Тамбейское, Западно-Тамбейское, Тасийское, Малыгинское, Южно-Тамбейское и Сядорское месторождения [3].

Новопортовское, Нурминское, Мало-Ямальское, Ростовцевское, Арктическое, Средне-Ямальское, Хамбейское, Нейтинское и Каменномыское месторождения обладают ресурсным запасом более 30 млрд газа и располагаются в Южной зоне [4]. Расположение зон на полуострове показано на рис. 1.

Сейчас особый интерес вызывает Каменномыское месторождение, которое является одним из перспективных для освоения. Показатели запасов ресурса на шельфе превышают 555 млрд м³. Проектную добычу природного газа планируют начать к 2025 г.

Акватория месторождения считается чрезвычайно сложной для осуществления газодобычи, поскольку имеет небольшие глубины и достаточно толстые льды. Температура на данном участке опускается до –60 °С, кроме того, довольно часто бывают сильные штормовые ветры.

Чтобы можно было осуществлять деятельность в таких экстремальных условиях, уста-

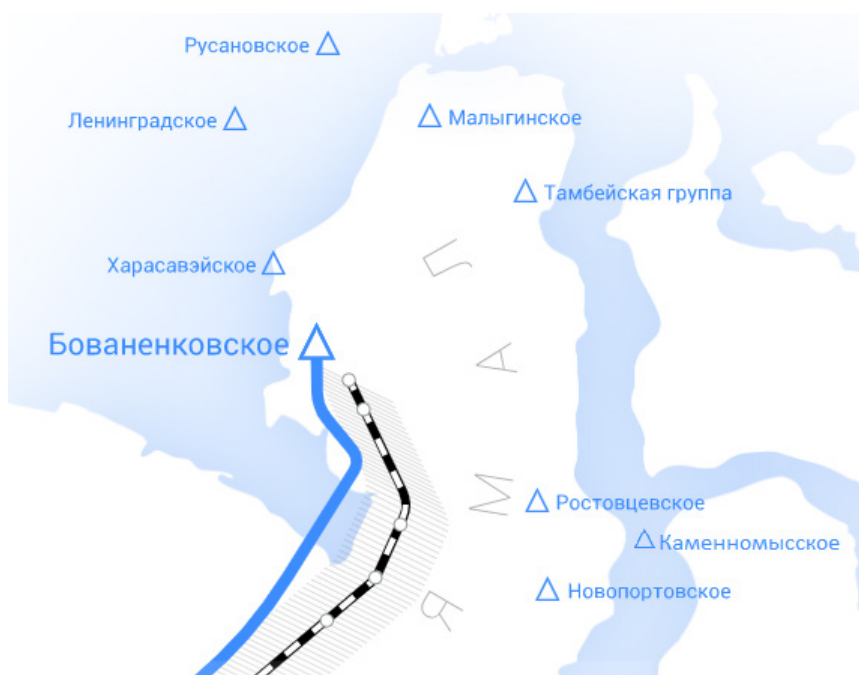


Рис. 1. Нефтегазоносные месторождения на полуострове Ямал

навливают специальные ледостойкие платформы (ЛСП), на которых размещают вспомогательные буровые модули, а также основной эксплуатационный и энергетический модули. Для того, чтобы защитить все оборудование от ветров и холода, оно помещается внутрь. Клиновидное опорное основание позволяет избежать давления толщ льда, а гравитационно-свайное крепление обеспечивает надежную фиксацию платформы на дне [5].

Для обеспечения работы электростанции может быть использовано газопоршневое (далее ГП) и газотурбинное (далее ГТ) оборудование. Несмотря на высокую стоимость ГТ оборудования, обусловленную меньшим количеством про-

изводителей, предпочтение отдается ему, поскольку оно имеет меньшие размеры и достаточную мощность. ГП установки требуют значительного выделения площади для установки [6]. Сравнительная характеристика установок приведена в табл. 1.

Для обеспечения электроэнергией и отоплением на ЛСП обычно устанавливаются газотурбогенераторные установки. В их состав входят специальные дизель-генераторы, предусматриваемые на случай аварии для обеспечения бесперебойной работы, и аккумуляторные блоки. Силовые установки с приводом от газовых турбин приводят в работу все системы ЛСП [5].

Таблица 1

Сравнительная характеристика газотурбинной и газопоршневой установки

Параметр сравнения	Газотурбинная установка	Газопоршневая установка
Наивысший электрический КПД	30	40
Быстрота запуска	Нормальная	Нормальная
Наработка до капитального ремонта, ч	50	60
Требования к газу	Давление 16–20 Бар	Давление меньше 10 мБар
Шумность	Низкая	Требует установки глушителя
Экологичность	Высокая	Высокая
Стоимость за кВт мощности, долл.	1000–1300	400–600
КПД с когенерацией, %	До 80	До 85
Экономичность на кВт	Высокая	Высокая
Частота ТО	Редко	Часто (смена масла и фильтров)

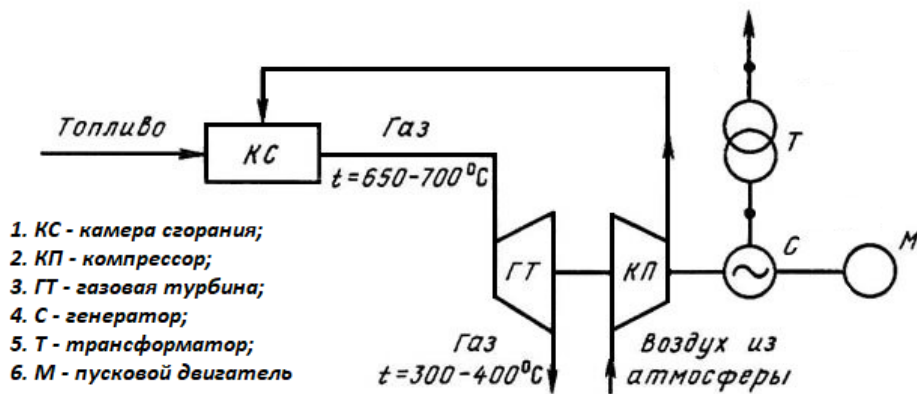


Рис. 2. Технологическая схема электростанции с газовыми турбинами

Газотурбинные электростанции (ГТЭС) на платформах могут использоваться на платформах в качестве основного источника питания.

Принцип работы ГТЭС заключается в следующем: в камеру сгорания нагнетается сжатый воздух и подается газ, которые образуют топливную смесь. Под давлением она нагнетается в компрессор и воспламеняется. Лопатки турбины приводит в движение струя раскаленного газа, которая вырывается из сопла. Вал турбины передает крутящий момент на ротор генератора. Он, в свою очередь, отвечает за выработку электроэнергии, которая проходит через трансформатор, и доходит до источника потребления [6]. Схематично принцип работы ГТЭС изображен на рис. 2.

Чтобы обеспечить бесперебойную работу электростанции, необходимо осуществить правильный выбор самой газотурбинной установки (ГТУ).

В настоящее время рынок производителей такого рода оборудования незначителен. Основными поставщиками выступают зарубежные компании, такие как «General Electric», «Siemens», «Ansaldo Energia». Из отечественных компаний можно отметить «РЭП Холдинг», «Силовые машины» и «ОДК-Газовые турбины». Сравним по мощности ГТУ у данных поставщиков. Сравнительная характеристика приведена в табл. 2.

Стоит отметить, что специализированно для нефтегазодобывающей промышленности занимаются изготовлением ГТУ зарубежные компании «Siemens» и «General Electric» и отечественная компания «ОДК-Газовые турбины». У последней компании, в свою очередь, основным продуктом являются ГТЭ и ГПУ, а также различное газоперекачивающее оборудование. Они предоставляют широкий спектр для выбора турбин различных мощностей. Диапазон мощностей турбин промышленного сектора, предназначенных для газодобычи, колеблется от 2 до 40 МВт.

Рассмотрим турбины производителей «Siemens» и «General Electric» в диапазоне промышленных мощностей. Немецкая компания может предложить четыре типа турбин для производства электроэнергии: SGT-600 (24,77 МВт), SGT-700 (31,21 МВт), SGT-750 (35,93 МВт) и SGT-800 (47 МВт) [7]. Технические характеристики турбин приведены в табл. 3.

Из сравнительной характеристики в таблице видно, что турбина SGT-700 обладает минимальными размерами, как и турбина SGT-600, но превосходит ее по мощности выработки электроэнергии. SGT-750 имеет большие габариты по сравнению с SGT-700, при этом значения показателя по электроэнергии больше всего на 4,72 МВт.

Таблица 2

Сравнительная характеристика по мощности ГТУ

Компания-производитель	Мощность ГТУ, МВт
«General Electric» (США)	42–700
«Siemens» (Германия)	5–530
«Ansaldo Energia» (Италия)	80–500
«Силовые машины» (Россия)	65–70
«РЭП Холдинг» (Россия)	16–32
«ОДК-Газовые турбины» (Россия)	2,5–25

Таблица 3

Технические характеристики газовых турбин компании «Siemens»

Показатели \ Тип турбины	SGT-600	SGT-700	SGT-750	SGT-800
Топливо	Природный газ	Природный газ	Природный газ	Природный газ
Частота	50/60Гц	50/60Гц	50/60Гц	50/60Гц
Электрический КПД,	34,2	36,4	38,7	37,5
Удельный расход тепла, кДж/кВт-ч	10 533	9 882	9 296	9 597
Частота вращения турбины, об./мин	7 700	6500	6100	6 608
Степень сжатия компрессора	14:1	18,6:1	23,8:1	19:1
Расход выхлопных газов, кг/с	80,4	94	113,3	131,5
Температура, °С	543	528	462	544
Вес (пакет энергоблок), кг	150 000	169 193	175 000	285 000
Размеры (пакет энергоблок) (Д×Ш×В), м	18,8×4,6×4	18,8×4,6×4	20,3×4,8×4,1	20,8×7,3×6,6

Таблица 4

Технические характеристики газовых турбин компании «General Electric»

Показатель	Тип турбины		
	LM 2500 DLE	LM 2500+DLE	LM 2500+G4 DLE
Топливо	Природный газ	Природный газ	Природный газ
Мощность	22,4	31,1	33,4
Электрический КПД, %	34	36	38
Расход выхлопных газов, кг/с	67,5	41,2	96,6
Удельный расход тепла, кДж/кВт-ч	10 156	9474	9671
Температура, °С	547	539	552

Таблица 5

Технические характеристики ГТУ ГТА-6РМ

Показатель	Характеристика
Номинальная мощность, МВ	6,3
Напряжение на клеммах ТГ, кВ	6,3/ 10,5
КПД, %	32,0
Коэффициент использования топлива (когенерация), %	75,6
Межремонтный ресурс, ч	25 000
Назначенный ресурс, ч	100 000
Срок службы, лет	20
Расход топливного газа на номинальном режиме, кг/ч	1 418
Тепловая мощность, Гкал/ч	7,5
Габариты станции (Д×Ш×В), м	14,6×3,6×3,8

Американская компания выпускает газовые турбины трех типов: GE LM, GE Frame и GE Alstom GT13E2. Тип GE LM – турбины на базе авиационных двигателей, мощностью 26–30 МВт. GE Frame – тип с повышенными мощностными характеристиками от 60 МВт. Газовые турбины типа Alstom GT13E2 отличаются высокими показателями – более 180 МВт [8].

Типом, который наиболее отвечает требованиям, является GE LM с мощностями 22–33 МВт. В данном сегменте представлено три турбины серии LM 2500 (22–33 МВт) (табл. 4).

Газовые турбины поколения LM 2500 также отличаются друг от друга большим количеством ступеней сжатия в компрессоре и увеличивающейся температурой горения, от которой зависит мощность. Стоит отметить, что американская компания поставляет турбины и генераторы отдельно, а не пакетом производства электроэнергетики, как делает компания «Siemens».

Рассмотрим оборудование, которое производит отечественная компания «ОДК-Газовые турбины». Для обеспечения бесперебойной работы ЛСП компания может предложить ГТЭ производственной мощностью 36 МВт. Ком-

пактная газотурбинная электростанция включает в себя 6 ГТУ ГТА-6РМ с мощностью 6 МВт. Технические характеристики турбины приведены в табл. 5.

Стоит отметить, что данные агрегаты выпускаются с блочно-контейнерным виде, что играет немаловажную роль при установке и разме-

щении ГТЭ на платформе. Электростанция может работать как на различных видах топлива, включая природный и попутный нефтяной газ [9].

По сравнению с установками, предлагаемыми зарубежными компаниями – отечественный производитель предлагает станцию, не уступающую по производственной мощности, выигрывающую по габаритным требованиям, что является лучшим предложением для ЛСП в акватории Обской губы в данном ценовом сегменте [9].

В Карском море в тяжелых условиях крайнего севера ключевым объектом для добычи газа на Камennomыссом месторождении будет ледостойкая платформа. Ее бесперебойную работу будет обеспечивать газотурбинная электростанция производства отечественной компании «ОДК-Газовые турбины». Предположительно, платформа будет доставлена к месторождению в 2024 г, добычу планируется начать в 2025 г.

Библиографический список

1. Официальный сайт Министерства финансов России: Информация о дополнительных нефтегазовых доходов федерального бюджета. URL: https://minfin.gov.ru/ru/statistics/fedbud/oil/?id_65=122094-svedeniya_o_formirovanii_i_ispolzovanii_dopolnitelnykh_neftegazovykh_dokhodov_federalnogo_byudzheta_v_2018-2020_godu (дата обращения: 04.12.2020).
2. Ветрова Д. А., Уголков С. В. Особенности организации перевозки промышленного оборудования на Ямал // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Материалы Первой Международ. науч. конф. СПб., 14–22 апр. 2020 г. СПб.: ГУАП, 2020.
3. Сайт ПАО «Газпром». URL: <https://www.gazprom.ru/projects/yamal/> (дата обращения: 04.12.2020).
4. Сайт ПАО «Газпром»: добыча на шельфе. URL: <https://www.gazprom.ru/projects/kamennomysское/> (дата обращения: 04.12.2020).
5. Применение возобновляемых источников энергии на нефтегазодобывающих платформах. URL: http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/rynok-3d-pechati-v-rossii-i-mire-additivnoe-proizvodstvo-ap-additive-manufacturing-am-2018-g-20190117060056 (дата обращения: 04.12.2020).
6. Сайт ГК «МКС»: ГТЭС. URL: <https://mks-group.ru/a/gazoturbinnaya-elektrostantsiya> (дата обращения: 04.12.2020).
7. Брошюра компании Siemens: Промышленные газовые турбины. URL: Режим доступа: http://amgcorporation.de/images/catalog/generation/amg-generation_siemens_5-50-mw.pdf (дата обращения: 04.12.2020).
8. Сервис DM Energy: General Electric. URL: <https://dm.energy/gazovye-turbiny/general-electric> (дата обращения: 04.12.2020).
9. Сайт компании «ОДК-Газовые турбины»: Газотурбинные электростанции. URL: <http://odk-gt.ru/index.php/ru/karera/16-press-tsentr/novosti-predpriyatiya/> (дата обращения: 06.12.2020).

УДК 629.4.05

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-86-91

А. А. Воробьев*

доктор технических наук, доцент

А. М. Будюкин*

кандидат технических наук, доцент

В. Г. Кондратенко*

кандидат технических наук, доцент

А. М. Перепеченов*

кандидат технических наук, доцент

* Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ПОЕЗДОВ НА ОТЕЧЕСТВЕННОМ РЕЛЬСОВОМ ТРАНСПОРТЕ

Рассмотрено состояние и предложены пути решения проблемы, связанной с внедрением беспилотных поездов на российской железной дороге, метрополитене и наземном рельсовом транспорте. Внедрение беспилотных технологий позволит повысить безопасность и скорость движения поездов за счет исключения из системы управления человеческого фактора, а также отпадает необходимость соблюдения режимов работы локомотивных бригад. Применение данной технологии позволит получить народному хозяйству существенный экономический эффект. Проблема рассмотрена в приложении к изучению дисциплины «Автоматика и автоматизация производственных процессов» для бакалавров направления 23.03.03 – «Автомобильный сервис».

Ключевые слова: беспилотный транспорт, автономная работа, система машинного зрения, инфраструктура, безлюдные технологии.

A. A. Vorobiev*

Dr. Sc., Tech., Associate Professor

A. M. Budyukin*

PhD, Tech., Associate Professor

V. G. Kondratenko*

PhD, Tech., Associate Professor

A. M. Perepechenov*

PhD, Tech., Associate Professor

* Petersburg State University of the Ways of Communication of Emperor Alexander I

PROSPECTS FOR THE USE OF UNMANNED TRAINS IN DOMESTIC RAIL TRANSPORT

The paper considers the state of affairs and proposes ways to solve the problem associated with the introduction of unmanned trains on the Russian railway, subway and ground rail transport. The introduction of unmanned technologies will improve the safety and speed of trains by eliminating the human factor from the control system, and there is no need to comply with the operating modes of locomotive crews. The use of this technology will allow the national economy to obtain a significant economic effect. The problem is considered in the appendix to the study of the discipline «Automation and automation of production processes» for bachelors of the direction 03.03.03 – «Automotive service».

Keywords: unmanned vehicles, autonomous operation, machine vision system, infrastructure, unmanned technologies.

На железных дорогах мира испытания поездов без машинистов начались в 1940-х гг., но только в середине 1960-х гг. в Сан-Франциско появились первые такие пригородные электрички, курсирующие в тестовом режиме. В России аналогичные эксперименты начались только в 1957 г., и первый советский «робот-поезд» ЭР2А был запущен на Октябрьской железной дороге в 1963 г. (рис. 1).

Локомотивная бригада в кабине этой электрички осталась только для наблюдения и кон-

троля за прохождением маршрута. Электронная система сама набирала и снижала скорость, а также вовремя останавливала состав на станциях. Чтобы устройство могло определять свое местонахождение, на рельсах в определенных точках установили датчики гамма-излучения. Поезд обслуживал линию пригородного сообщения от Москвы до станции Клин. Появился и первый экономический эффект от эксплуатации этого электропоезда. Система автоматизации позволяла устанавливать режим движе-



Рис. 1. Первый советский «робот-поезд»

ния, максимально сберегающий электроэнергию. В прессе уже начали обсуждать, что автомашины скоро смогут водить не только пригородные, но и дальние пассажирские и грузовые поезда, особенно скоростные. В СССР испытывались и другие автономные модели, но, к сожалению, до их широкого внедрения дело не дошло, и первую электронную систему автомашиниста демонтировали после нескольких лет эксплуатации. В числе причин вывода из эксплуатации называли слабые возможности вычислительной техники того времени и конструктивные решения.

Несмотря на большое количество разработок, в рейтинге готовности к использованию беспилотного транспорта, составленном КРМГ, в настоящее время Россия заметно отстает в этой области от многих стран мира, что непосредственно связано в первую очередь с недостаточным инвестированием в эту отрасль, отставания законодательства и низкого уровня международной кооперации.

В некоторых странах существуют полноценные законы, способствующие развитию этого направления, а в России только недавно (ноябрь 2018 г.) появилось постановление правительства о проведении эксперимента по опытной эксплуатации высокоавтоматизированных транспортных средств. При этом оно охватывает территорию лишь нескольких субъектов и предусматривает обязательное наличие инженера на месте машиниста. Более того, документ предполагает лишь внесение изменений в конструкцию транспортных средств и полностью игнорирует беспилотные технологии как основополагающие.

Сейчас беспилотные пассажирские поезда курсируют в 20 странах мира. Дальше всего среди рельсового транспорта эти технологии наш-

ли свое применение на метрополитене, так как инфраструктура здесь закрыта, других участников движения. В Париже, например, автоматически управляемые поезда курсируют между аэропортом Орли и станцией экспресс-метро «Антони». Без машинистов работает и метро Копенгагена. А в Ванкувере действует легкое метро SkyTrain – самая протяженная в мире система скоростного транспорта с полностью автоматизированным управлением [1].

Руководство компании АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ) считает, что производители в России уже готовы к переходу на беспилотные технологии на транспорте. Все современные поезда могут быть оборудованы необходимыми для этого системами. Однако даже самые продвинутые составы будут бесполезны без соответствующей автоматики в тоннелях и на станциях. Поэтому на запуск беспилотного российского метрополитена потребуется по нашему мнению от 7 до 10 лет.

В разработках ТМХ есть системы, обеспечивающие беспилотное движение поездов метро и маневровых локомотивов, но массового внедрения они пока не получили (как уже отмечалось) из-за неготовности инфраструктуры и отсутствия нормативной базы.

Выгодно ли модернизировать обычный поезд в беспилотный, зависит от конкретного случая. Например, старый локомотив ВЛ80 с остатком ресурса в несколько лет модернизировать нет смысла, а новый «Ермак» уже изначально готов к применению этих новых технологий, как и весь подвижной состав, который выпускает ТМХ. До конца года «ЛокоТех-Сигнал» обещает представить Московскому метрополитену систему, для существующего подвижного состава которая в автоматическом режиме будет выбирать оптимальную стратегию ведения поезда в зависимости от данных, полученных из центра управления, от инфраструктуры и с учетом положения впереди идущего состава. Новая система будет обкатываться на Некрасовской ветке московского метро и в случае удачной реализации тиражироваться на другие маршруты столичной подземки.

В настоящее время Минтранс России работает над системным устранением технологических препятствий для развития беспилотного транспорта и будет настаивать на выделении новых радиочастот ООО «ГЛОНАСС-ТМ» (совместное предприятие АО «ГЛОНАСС» и «РТ-Инвест Транспортные системы»). Это необходимо для создания единой федеральной системы транспортной телематики. *Единая система транспортной телематики* – это полоса частот

не для неограниченного круга лиц, а исключительно для применения в сфере транспорта, чтобы она была всегда настолько свободна, чтобы все беспилотные транспортные средства могли без помех пропускной способности этой частоты обеспечивать взаимодействие». Заявка подана еще год назад, но вопрос пока так и не решен. В очередной раз эта тема обсуждалась на Госкомиссии по радиочастотам в конце октября 2019 г. Сейчас Минтранс совместно с «Автодором» ведут работу по созданию «умной» инфраструктуры для беспилотного транспорта, которая обеспечит взаимодействие среды и высокоавтоматизированных транспортных средств.

Параллельно беспилотные технологии развиваются на *трамвайных путях*. Трамвай движется по строго определенной траектории, и у него нет необходимости разбираться в многообразии дорожных знаков, как, к примеру, автороботам. Он имеет массу преимуществ по правилам дорожного движения, однако «интеллект» трамвая должен быть на несколько ступеней выше поезда метрополитена или локомотива железнодорожного транспорта, поскольку он постоянно сталкивается с самым опасным и непредсказуемым дорожным фактором – человеком. Трамвай должен различать транспортные средства, светофоры, пешеходов, положение дорожных стрелок, уметь останавливаться перед препятствиями и возобновлять движение, когда они исчезнут, просчитывать безопасную дистанцию до впереди идущего транспортного средства.

Совсем недавно компания «ПК Транспортные системы» совместно с российским разработчиком беспилотных систем Cognitive Technologies испытали первый в России *беспилотный трамвай Богатырь М* (рис. 2).

Его «органы чувств» состоят из 10–20 камер, расположенных по периметру корпуса, а также из десятка радаров и высокоточного датчика GPS. Камеры распознают дорожную ситуа-

цию до 90%, но это совершенно недопустимая цифра, ведь остальные 10% – это аварии. Поэтому в дополнение к камерам стали использовать оптические датчики – *лидары*, которые доводят уровень распознавания до 99%. Технология комбинированных данных Cognitive low level data fusion гарантирует лишь одну ошибку на 50 ч проезда в любых погодных условиях.

Сначала трамвай «Богатырь-М» успешно прошел испытания на площадке депо им. Н. Э. Баумана, а затем на маршруте «Останкино – Медведково» в условиях усиленного трафика (рис. 3). Теперь модернизированный трамвай «Богатырь-М» курсирует по другому московскому маршруту, а система машинного зрения приобретает все новые навыки.

Сотрудники департамента разработки беспилотных транспортных средств Cognitive Technologies, считают, что подготовка трамвая к автономной работе должна проводиться постепенно.

На первом этапе система в большей степени будет предупреждать машиниста об опасности на дороге, сама же имеет право реагирования только в том случае, если это не сделал машинист. Впоследствии на переходный период человек сможет находиться в кабине уже в качестве резервной единицы. Специалисты «ПК Транспортные системы» добавляют, что трамвай можно и дальше оборудовать более совершенными радаром, камерами и прочими системами машинного зрения, но выполненные испытания показали, что он уже и так готов к самостоятельной эксплуатации, но существующая инфраструктура пока еще далека от необходимого уровня. Это, в первую очередь, относится к автоматизации для осуществления парковки и выезда трамвая.

Есть и более серьезная проблема. Прodelав колоссальную работу, производители столкнулись с непреодолимым препятствием – выпустить инновационную модель на городские до-



Рис. 2. Беспилотный трамвай «Богатырь-М»



Рис. 3. В кабине беспилотного трамвая «Богатырь-М» во время поездки

роги *не позволяет закон*. Таким образом, становится невозможным эксплуатация беспилотных трамваев. Умный трамвай может работать только с вагоновожатым и без пассажиров.

Итак, для окончательного решения проблемы запуска беспилотного подвижного состава в эксплуатацию необходимо решить следующие проблемы:

- законодательные пробелы;
- отсутствие необходимой инфраструктуры;
- страх пользователей доверить свою безопасность роботам;
- неготовность рынка труда перестраиваться под безлюдные технологии;
- человек как непредсказуемый фактор дорожной ситуации;
- большие затраты на изменение конструкции подвижного состава.

Следующим важным для России направлением внедрения беспилотных технологий – *маневровая работа на станциях*. Как и в случае с метро, здесь нет других участников движе-

ния па влияние человеческого фактора сведено к минимуму, что несколько упрощает решение поставленной задачи. Поэтому, например, уже с 2015 г. на станции Лужская-Сортировочная в Ленинградской области работают локомотивы ТЭМ7А без машиниста (рис. 4) [2].

В Щербинке на Международном железнодорожном салоне «PRO//Движение. Экспо» компания ТМХ продемонстрировала двухосный маневровый тепловоз ТЭМ5Х, разработанный совместно с группой компаний Ctrl2GO. В этом проекте впервые удалось системно объединить широкий набор технологических и цифровых решений. ТЭМ5Х обладает гибридной силовой установкой, быстросъемной и конфигурируемой модульной платформой, машинным зрением с возможностью дистанционного управления и системой прогнозирования технического состояния оборудования на основе искусственного интеллекта. Концепт создан с целью апробации инноваций, на базе которых предполагается создать новое семейство локомотивов (рис. 5).



Рис. 4. Станция Лужская-Сортировочная в Ленинградской области



Рис. 5. Гибридный маневровый тепловоз ТЭМ5Х на выставке в Щербинке

Решение на основе «компьютерного зрения», которым предполагается оснащение локомотива, будет обеспечиваться тремя уровнями автоматизации управления. На первом этапе система предотвращения столкновений будет выступать в качестве помощника для машиниста. Это позволит снизить нагрузку, повысит безопасность движения и обеспечит возможность контролировать состояние инфраструктуры. На следующем этапе машинист сможет пересест из кабины локомотива за пульт дистанционного управления и удаленно управлять одним или несколькими локомотивами. В будущем на третьем этапе возможен переход на полностью автоматизированное управление. Надежность работы будет обеспечиваться системы установленные на локомотиве оптические камеры, лидары, ультразвуковые датчики и высокопроизводительные вычислительные блоки обработки данных.

Последствия отказа от машиниста для магистрального локомотива и маневрового разные: магистральный локомотив гораздо тяжелее маневрового, поэтому имеет большой тормозной путь; он эксплуатируется там, где зачастую нет связи, поэтому его можно контролировать только через спутник. К тому же сам подвижной состав должен обладать сверхвысокой надежностью, так как в случае отказа беспилотный поезд может заблокировать целый перегон, что приведет к большим эксплуатационным проблемам и задержкам движения поездов.

В России существует еще один полигон для исследований в области беспилотного движения – это Московское центральное кольцо (МЦК). Там уже используется система интервального регулирования, позволяющая совмещать грузовое и пассажирское движение. Поезда оборудованы бортовыми информационно-измерительными системами, интегрированными в конструкцию подвижного состава. Они диагностируют состояние элементов инфраструктуры. Один из электропоездов снабжен бортовым комплексом ультразвуковой дефектоскопии рельсов, что позволило отказаться от вагон-лабораторий.

Система диспетчерского управления поездами в режиме реального времени автоматически выстраивает план пропуска поездов и дистанционно передает на борт расписание и график их движения. В зонах ограниченной видимости используются стационарные установки, которые мониторят состояния путей и в случае возникновения препятствия сигнализируют об этом всем поездам на маршруте. Многие инновации, внедренные на МЦК для беспилотного движе-

ния, используются впервые в мировой практике.

Руководство ОАО «РЖД» утверждает, что МЦК в целом готово к внедрению беспилотного движения, пока тестирование все еще продолжается, это дает время на разработку необходимых нормативных документов, регулирующих эксплуатацию поездов без машинистов. Как утверждает руководитель центра систем безопасности движения НИИАС, машина безошибочно распознает людей. Осталось сократить количество ложных срабатываний и научить камеры выявлять мелкие предметы на больших расстояниях. Сейчас на МЦК системой машинного зрения оснащен один поезд. Планируется, что с 2021 г. все составы (а это 51 электропоезд) начнут курсировать в автоматическом режиме.

Для успешного внедрения на железной дороге локомотиву требуется кардинальная модернизация. Это связано с тем, что все узлы техники построены на превентивном отключении в случае неисправности. Например, если некорректно работает тяговый электродвигатель, происходит его автоматическое отключение. И нет возможности его перезапустить. Очевидно, что в беспилотном варианте такая схема неприменима. При беспилотном варианте мы не можем позволить себе автомат, так как, если его выбьет, локомотив не сможет поехать: некому будет его включить. Вот почему локомотив должен быть модернизирован для решения этой проблемы.

Также один из ключевых технических моментов связан с детектированием препятствий, обучением моделей реагировать на них. Типичный случай – человек возле путей. Очень сложно предугадать его поведение: он может броситься под колеса, продолжать стоять или попробовать успеть перебежать перед поездом. Машинист или оператор может интуитивно это определить. «Умная» машина, которая видит человека, тоже должна уметь распознавать такие тонкие моменты. Так что обучение нейронной сети – это большой технологический вызов. Речь идет о том, когда машинист может отсутствовать в кабине, но должен находиться в поезде. В РЖД считают, что это лишь переходный этап к полному отсутствию машиниста. Недавно ТМХ с РЖД подписали соглашение, по которому опция беспилотного дистанционного управления станет базовой функцией новых моделей [3].

Немаловажным фактором для успешного внедрения новых технологий является и успешное решение социальных проблем. Так в обществе распространена боязнь беспилотников. По наблюдениям социологов, люди склонны видеть

в новых технологиях не помощников, а конкурентов. К примеру, штат сотрудников автоматизированной сортировочной станции требует на 50% меньше сотрудников, чем обычной. По опыту станции Лужская-Сортировочная видно, что машинист маневрового локомотива с дистанционным управлением может совмещать свои базовые обязанности с выполнением дополнительных такими как составление поездов и осмотр вагонов.

Многие эксперты сомневаются, что в обозримом будущем удастся полностью отказаться от профессии машиниста, хотя уже сегодня 90% своего рабочего времени он отвечает за соблюдение скоростного режима и предупреждение аварийных ситуаций. Машинист все еще нужен для обеспечения безопасности движения, поэтому убрать его из кабины локомотива пока не получится еще некоторое время. Человек пока необходим для решения постоянно возникающих нештатных ситуаций. В то же время с развитием беспилотников остро встанет вопрос пе-

реформирования рынка труда и исчезновения отдельных востребованных сегодня профессий и все ближе наступает момент, когда высокие технологии станут более привлекательными, надежными и более дешевыми чем привлечение живой рабочей силы.

Библиографический список

1. Беспилотники. URL: <https://trainandbrain.ru/> (дата обращения: 31.05.2020).
2. Системы искусственного интеллекта уже применяются на сети // Гудок: газета. 28.02.2019. Вып. № 34 (26643). С. 6.
3. Цифровая железная дорога и переход от сети gsm-r к lte-r и 5g-r – состоится ли он? / М. А. Шнепс-Шнеппе, Н. О. Федорова, Г. В. Суконников, В. П. Куприяновский. 2017. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-zheleznaya-doroga-i-perehod-ot-seti-gsm-r-k-lte-r-i-5g-r-sostoitsya-li-on> (дата обращения: 31.05.2020).

УДК 339.133.017:656

М. О. Гидроец *

магистрант

Л. И. Гришанова*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АНАЛИЗ РЫНКА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В РОССИИ

Рассмотрено развитие рынка электромобилей в России. Произведен анализ модельного ряда, количества зарядных станций и затрат на содержание. Оценен ущерб, наносимый экологии при производстве и эксплуатации электрокаров.

Ключевые слова: электромобиль, зарядные станции, оценка воздействия на экологию, литий-ионные аккумуляторы.

M. O. Gidroets*

Postgraduate Student

L. I. Grishanova*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

MARKET ANALYSIS OF ELECTRIC CAR IN RUSSIA

The article considers development of the electric vehicle market in Russia. The model range, number of charging stations, and maintenance costs were analyzed. The damage caused to the environment during the production and operation of electric cars was assessed.

Keywords: electric car, charging station, assessment of the impact on the environment, lithium-ion batteries.

Негативное влияние транспорта с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) на окружающую среду – самая актуальная экологическая проблема в России. По данным на 1 января 2020 г., в России насчитывается 44,5 млн легковых автомобилей с ДВС и только 6,3 тысяч электрокаров [1]. Электромобиль расходует 23,4 кВт·ч энергии на 100 км пути, гибридный автомобиль расходует 57,53 кВт·ч на 100 км (в 2,4 раза больше, чем электромобиль), легковой автомобиль с ДВС – 75,24 кВт·ч на 100 км (в 3,2 раза больше, чем электромобиль). При всех плюсах электрокаров, их процент от общего числа транспортных средств в России составляет 0,014%, в то время как в Норвегии почти 30%. Попробуем разобраться с чем связана такая низкая привлекательность электромобиля для Российского потребителя [2].

На сегодняшний день, для приобретения в России доступны 10 моделей электромобилей. Цены варьируются от 900 000 до 10 000 000 рублей, запас хода от 150 до 650 км. Проведем анализ рынка новых автомобилей, в ходе которого выявим автомобили с ДВС, имеющие аналогичную стоимость с доступными к покупке электрокарами (табл. 1) [3].

Проанализировав данные табл. 1, можно заключить, что электромобили могут составить конкуренцию транспортным средствам с ДВС только в вышем ценовом диапазоне (более 5 млн руб.). В ценовом диапазоне от 900 000 до 5 000 000 рублей, в котором находятся 97% покупателей, автомобили с ДВС выигрывают по всем потребительским критериям. Этот факт и заставляет большинство потребителей в России склонить свой выбор в пользу классических автомобилей. Остальные 3% автолюбителей, как правило приобретают электромобиль в качестве игрушки, а не каждодневного средства передвижения.

Еще одна причина низкой популярности электрокаров в России – отсутствие разнообразия модельного ряда. Более 80% зарегистрированных в стране электромобилей приходится на модель Nissan Leaf – автомобиль с весьма специфичным внешним видом и экстерьером. Российского потребителя, как правило, отпугивает футуристичный дизайн при выборе транспортного средства.

Отсутствие заправочных станций и прочей инфраструктуры также негативно сказывается на продаже электромобилей. В России на се-

Таблица 1

Сравнительная характеристика рынка электромобилей и автомобилей с ДВС

Стоимость, руб.	Электромобиль			Автомобиль с ДВС		
	марка/модель	запас хода, км	класс	марка/модель	запас хода, км	класс
900 000	Mitsubishi i-MIEV	160	A	Kia Rio IV	757	B
1 000 000	Lada El Lada	150	A	Skoda Rapid II	916	B
2 400 000	Nissan Leaf	160	B	Toyota Camry	722	D
2 600 000	Renault kangoo Z.E. 33	270	M	BMW 3 серии VI	888	D
3 900 000	BMW i3	260	B	Mercedes-Benz E-Класс	700	E
5 000 000	Toyota RAV4 EV	160	J	Porsche Macan I	833	J
6 000 000	Jaguar I-Pace	480	J	BMW X5 IV	1 220	J
10 000 000	Tesla Model S, Model X, Model 3	650	F	Mercedes-Benz S-Класс	1 093	F

годняшний день насчитывается 160 заправочных станций, из которых около 100 в Москве, 28 в Санкт-Петербурге, десять в Челябинске и по две в Краснодаре, Самаре, Перми, Уфе и Екатеринбурге. Для сравнения количество классических автозаправочных станций (АЗС) в России превышает 70 000 [4]. Малое количество зарядных стоек не позволяет осуществить владельцу электрокара поездку на дальние расстояния, делая его заложником большого города. Также стоит отметить и долгое время зарядки электрокара: от обычной розетки около 8 ч, от зарядной станции около 1–3 ч. В то время как среднее время заправки классического автомобиля на АЗС составляет 8 мин.

Среди приверженцев электрокаров бытует мнение, что затраты на его содержания несопоставимо меньше с аналогичным транспортным средством на жидком топливе. Разберемся так ли это. Для эксперимента возьмем два конкурирующих транспортных средства, схожих по таким характеристикам как: цена, класс, мощность и запас хода. Расчет проводим для города

Москва, в котором отменили транспортный налог на электромобили, годовой пробег предполагаем 15 000 км (табл. 2) [5].

Данные, приведенные в табл. 2, абсолютно опровергают расхожее мнение дешевизны эксплуатации электромобиля. Владение статусным немецким седаном бизнес-класса в России оказывается почти в два раза выгоднее, чем ультра-современным электрокаром. Не спасает даже отмена транспортного налога, комплексное автомобильное страхование, кроме ответственности (КАСКО), обойдется владельцу электромобиля в очень «кругленькую» сумму.

Получается, что плюсы использования электромобиля в России на сегодняшний день весьма призрачные. Приобретают их только самые богатые и отважные – поклонники Илона Маска, любители футуризма и ярые защитники природы. Впрочем, насчет последнего есть большие вопросы. Производители электромобилей заявляют, что их продукт минимизирует ущерб окружающей среде. Однако свежие исследования ученых опровергают этот факт. Производ-

Таблица 2

Сравнительная характеристика стоимости владения

Вид транспортного средства	Электромобиль	Автомобиль с ДВС
Марка	Tesla	BMW
Модель	Model S I Рестайлинг	M5 VI (F90) Рестайлинг
Мощность, л. с.	795	625
Транспортный налог (в год)	0	75 000
ОСАГО, руб.	13 800	20 000
КАСКО, руб.	1 020 000	507 453
ГТО, руб.	720	720
Расходы на топливо, руб.	0	87 450
Сервис, руб.	120 000	220 000
Итого за год, руб.	1 154 520	712 623
Итого за месяц, руб.	96 210	59 385

ство и утилизация батарей для электромобилей наносят вред природе сопоставимый с десятилетиями эксплуатации автомобиля на жидком топливе. Литий-ионные батареи имеют в своем составе редкие металлы литий и кобальт, а также большое число редкоземельных элементов: неодим, лантан, тербий и диспрозий. Добыча этих элементов весьма губительно сказывается на окружающую среду [6].

Для наглядности сравним углеродный след электрокара и автомобиля с ДВС. С учетом производства батарей и добычей лития, неодима и кобальта углеродный след Tesla составляет 156–181 г CO₂ на километр пути. В это время углеродный след Mercedes-Benz с учетом загрязнения окружающей среды при его производстве и израсходованном топливе составляет 112 г CO₂ на 1 км [7].

К литий-ионным аккумулятором есть и еще одна веская претензия – отсутствие совершенной технологии их утилизации. В связи с чем производители электрокаров прорабатывают различные схемы использования старых литий-ионных батарей. Компания «Nissan» предлагает использовать старую батарею в качестве резервного источника питания в доме. В случае отсутствия электричества аккумулятор Nissan Leaf сможет обеспечить питание всех электроприборов в доме примерно на сутки.

Стоит учесть и способ получения электроэнергии. Сегодня в России примерно 70% всей электрической энергии производится на тепловых электростанциях. Среди которых 71% работает на природном газе, 27% – на угле, 2% – на мазуте и жидком топливе [8]. Получается электрокары в России тоже жгут топливо. Только в случае с классическим автомобилем сжигание топлива (получение энергии для движения) происходит непосредственно в месте ее потребле-

ния (под капотом), а электрокар сжигает топливо в другом месте.

Все рассмотренные факторы указывают на нецелесообразность использования электромобиля в Российских реалиях. Отсутствие хорошего предложения в среднем ценовом диапазоне, слабо развитая инфраструктура зарядочных станций, дороговизна эксплуатации и спорный фактор заботы об окружающей среде, заставляют отказаться российского потребителя от приобретения электрокара.

Библиографический список

1. Количество автомобилей в России. URL: https://www.gazeta.ru/auto/news/2020/02/21/n_14067151.shtml (дата обращения: 06.12.2020).
2. Парк электромобилей в России. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4268630> (дата обращения: 06.12.2020).
3. Новые легковые автомобили URL: <https://auto.ru/> (дата обращения: 06.12.2020).
4. Без питания: почему электромобили не ездят по России URL: <https://www.gazeta.ru/business/2020/02/02/12939890.shtml?updated> (дата обращения: 06.12.2020).
5. Калькулятор КАСКО URL: https://www.inguru.ru/kalkulyator_kasko (дата обращения: 06.12.2020).
6. Life-Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling / L. Gaines, J. Sullivan, A. Burnham, I. Belharouak // Argonne National Laboratory. 2011. January.
7. Buchal C., Karl H. Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz? // ifo Schnelldienst. 2019. April.
8. Энергетика России. URL: <https://energoseti.ru/articles/energetika-rossii> (дата обращения: 06.12.2020).

УДК 656.183

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-95-99

А. А. Добровольская*

магистрант

В. А. Фетисов*

доктор технических наук, профессор

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассматривается опыт использования и проектирования велодорожек на основе опыта Финляндии, а также типы расположения велосипедных дорожек и инфраструктурные особенности для мегаполисов. Приводится модель создания велодорожки путем частичного сужения проезжей части, графические функции и аналитическая информация. Приводятся практические примеры применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при проектировании велосипедных дорожек.

Ключевые слова: велосипедная дорожка, интенсивность движения, проектирование, проезжая часть, ширина полосы.

A. A. Dobrovol'skaya*

Postgraduate Student

V. A. Phetisov*

Dr. Sc., Tech., Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

BUILDING DIGITAL MODELS OF THE ROAD NETWORK FOR INFRASTRUCTURE MODERNIZATION USING UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

The article discusses the experience of using and designing bike paths based on the experience of Finland, as well as the types of bike paths and infrastructure features for megacities. A model for creating a bike path by partially narrowing the roadway, graphical functions, and analytical information are provided. Practical examples of the use of UAVs in the design of Bicycle paths are given.

Keywords: bike path, traffic volume, design the roadway, lane width.

Города развивались исторически, аналитические модели не всегда отражают реальную динамическую обстановку на дорогах. Современный тренд – переход от плоских данных к объемным решениям. Другой тренд – накопление большого количества растровых данных в связи с тем, что методы получения этих данных становятся все более совершенными и дешевыми в сравнении с традиционными методами создания векторной информации. Современные технологии позволяют на основе данных аэрофотосъемки, строить реалистичные измеряемые 3D-модели отдельных объектов и целых городских пространств. Эти модели при наличии некоторых инструментов затем можно использовать для решения иных задач. Необходимо разработать цифровые модели на основе БПЛА и приборных комплексов, которые позволяли бы получить динамику движения в 3D-виде.

Санкт-Петербург относится к балтийскому региону и один из основных трендов у стран для регуляции является использование экологических видов транспорта. Вместе с этим активно развивается велосипедная инфраструктура городов: в повседневную жизнь входят понятия велопрокат и кикшеринг, а количество велосипедных дорог непрерывно растет. Кроме того, что велосипеды и самокаты являются удобным способом ежедневного перемещения, возможность взять напрокат транспорт позволяет гостям города поближе познакомиться с городом без затрат, что может увеличить туристическую привлекательность города.

В городах Европы велосипед давно является альтернативой общественного транспорта (рис. 1), а инфраструктура значительно более развита.

В Хельсинки проложено более 1500 км велодорожек. Важным фактором является то, что

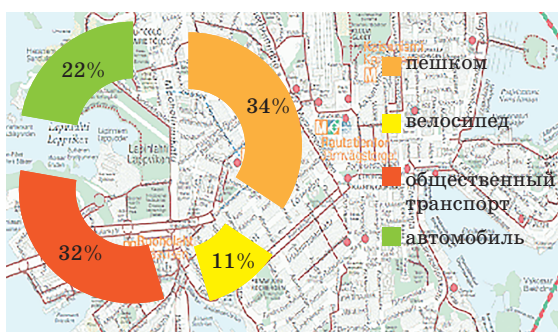


Рис. 1. Распределение перемещений в Хельсинки по различным видам транспорта

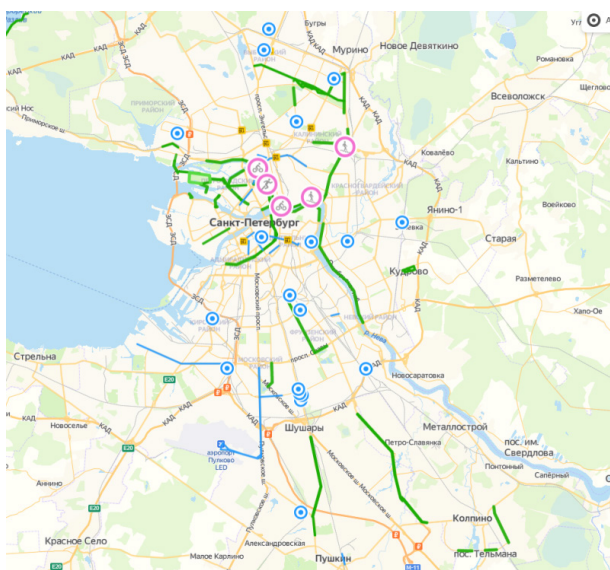


Рис. 2. Интерактивная карта велодорожек Санкт-Петербурга

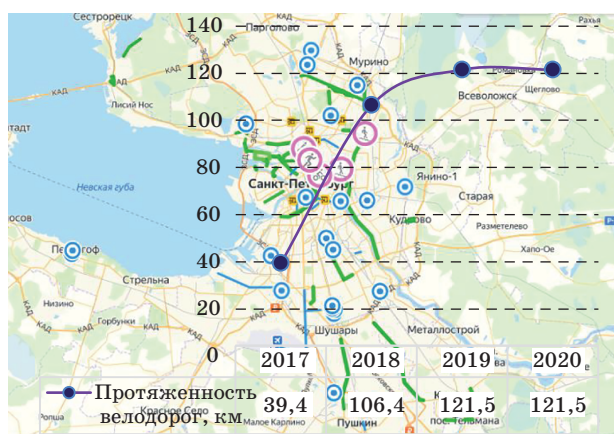


Рис. 3. Протяженность велодорожек в Санкт-Петербурге

велодорожки были заложены в городскую среду на этапе проектирования, поэтому сами они отделены от пешеходной и проезжей зоны для безопасности и удобства передвижения. Однако Хельсинки активно развивается: число жителей растет с каждым годом, а современные системы кикшеринга набирают все большую популярность. Отсюда также возникает потребность расширения и модернизации существующей сети велодорожек, для удовлетворения потребностей всех горожан.

В Санкт-Петербурге велоинфраструктура активно развивается, суммарная протяженность велосипедных дорожек в Санкт-Петербурге составляет 121,5 км [1]. Однако на данный момент не является полноценной частью городской транспортной системы. На интерактивной карте [2] (рис. 1) можно увидеть, что велосипедные маршруты обрываются или захватывают лишь некоторые участки, что делает велосипед видом досуга или развлечением, но никак не альтернативным видом транспорта и необходимостью.

В последние годы представления петербуржцев начинают меняться. Таким образом, основная задача создания новых велосипедных дорог – объединение городского транспорта и велоинфраструктуры для создания адекватных маршрутов передвижения, которые способны обеспечить беспересадочную поездку по городу с минимальным пересечением пешеходных и автомобильных полос движения, а также отработка возможных маршрутов перемещения из удаленных районов в центральную часть города с использованием городского или пригородного пассажирского транспорта.

Велосипедные дорожки создают разграничение потоков автомобилей, велосипедов и пешеходов, что позволяет предугадывать поведение участников дорожного движения и обеспечивать их безопасность. Главным требованием к устройству велосипедных дорожек при проектировании является обеспечение безопасности движения велосипедистов, а при обустройстве автомобильной дороги велосипедной полосой, не должны ухудшаться условия безопасности дорожного движения и условия использования автомобильной дороги. Для создания всех условий безопасности, велосипедные дорожки должны оборудоваться соответствующей инфраструктурой: дорожными знаками, разметкой, ограждениями и светофорами, также могут отличаться типом и цветом покрытия. Основные типы расположения велосипедных дорожек: отдельно от пешеходной и проезжей части; на уже имеющейся зоне для пешеходов; на проезжей части.

Процесс проектирования велосипедных дорожек должен производиться в несколько этапов.

1. Сбор исходных данных:

- организация дорожного движения на существующем участке;
- интенсивность передвижения пешеходов и автомобилей;
- геометрические параметры дорог на выбранном участке.

2. Разработка предварительного маршрута велосипедной дорожки:

- выбор пункта отправления и пункта прибытия;
- выбор предварительного маршрута.

3. Разработка окончательного маршрута велодорожки:

- выбор соответствующего типа расположения велосипедной дорожки при заданных исходных данных;

- составление окончательного веломаршрута.

4. Определение места и параметров размещения элементов инфраструктуры.

Рассмотрим возможность применения беспилотных летательных аппаратов на каждом этапе проектирования.

В России появляются положительные примеры использования 3D-моделей, прежде всего, в сфере градостроительства. Ортофотопланы используются в качестве базовых слоев информационной системы обеспечения градостроительной деятельности, что позволяет выполнять контроль строительства и предоставляемой исполнительной документации, отвода земельных участков. В мероприятиях по земельному надзору ортофотопланы стали наглядным доказательством нарушений, что позволило решать большинство споров в досудебном порядке и экономить время и ресурсы. Беспилотные летательные аппараты оказываются весьма полезны при мониторинге строительства объектов. Геодезическая точность и высокое разрешение результатов съемки позволяют определять объемы насыпей и выемок, величины площадей без необходимости выполнения большого объема дорогостоящих геодезических работ. БПЛА может близко подлететь к особенно интересной для строителей или поверяющих части объекта или выполнять ежедневную съемку по одному и тому же режиму в автоматическом режиме. Заинтересованные лица получают набор снимков, которые легко преобразовать в 3D-модель, позволяющую наглядно фиксировать все происходящие изменения.

В качестве проекта велосипедной дорожки был выбран участок от существующей дорожки на Тихорецком проспекте до Муринского парка, поскольку возникающий разрыв велосипед-

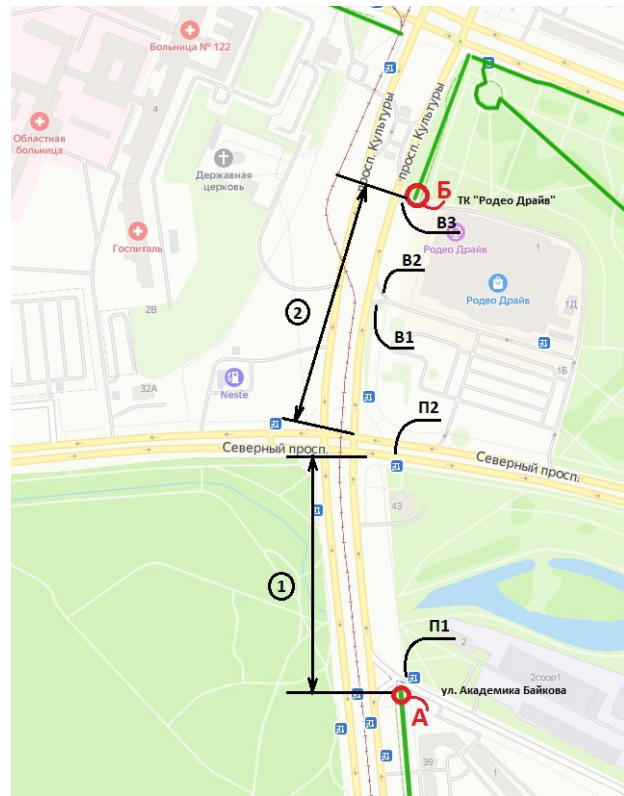


Рис. 4. Анализ проектируемого участка

ной дороги делает перемещение до парка неудобным и небезопасным. Таким образом, необходимо обеспечить путь для велосипедистов, оборудованный всеми необходимыми техническими средствами, который позволит не создавать помехи для автомобилей и пешеходов.

В первую очередь, необходимо проанализировать интересующий участок (рис. 4).

На рис. 4 1, 2 – участки велосипедных дорог; П1 – перекресток 1 (пересечение Тихорецкого пр. и ул. Академика Байкова); П2 – перекресток 2 (пересечение пр. Культуры и Северного пр.); В1, В2, В3 – выезды торгового центра.

На данной схеме можно увидеть, что на участке (1) расположена пешеходная и зеленая зона (около 27 м), поэтому данный участок позволяет проектировать наиболее оптимальный тип расположения дорожки – отдельно от пешеходной и проезжей части. На участке (2) существует возможность проектирования дороги по проезжей части. Для более точного анализа интересующего участка необходимо применить технологию аэрофотосъемки.

Технология аэрофотосъемки на основе БПЛА состоит из следующих этапов [3].

1. Подготовительные работы:

- сбор и систематизация имеющихся материалов;



Рис. 5. Дорожная разметка

– формирование требований к материалам, которые необходимо получить по результатам съемки.

2. Аэрофотосъемка;

– формирование полетного задания для БПЛА.

Выполняется программой – планировщиком полета, входящей в состав комплекса. Оператор должен выбрать используемый комплекс БПЛА, задать на карте контур участка съемки и примерное положение стартовой площадки, установить требуемое разрешение и перекрытие, после чего программа рассчитывает план полета и проверяет его выполнимость;

– аэрофотосъемка.

3. Обработка полученных данных.

– снятие данных с фотокамеры;

– визуальная оценка качества фотографий и сортировка снимков;

– фотограмметрическая обработка полученных снимков (получение цифровой модели рельефа, ортофотоплана);

– дешифрирование и составление цифровой модели местности.

Ширина полосы движения составляет 3,5 м, ширина велодорожки должна составлять 2,00 м, а ширина буфера велодорожки 0,5 м [4]: общая ширина полосы – 3 м.

Исходя из зависимости ширины проезжей части от скорости движения, при частичном сужении проезжей части, скорость движения автомобилей снижается на 29%, но находится в пределах безопасной скорости движения в городских условиях.

$$H = 0,015V + b + 0,3, \quad (1)$$

где b – ширина автомобиля, м; V – скорость движения автомобиля, км/ч; 0,3 – дополнительный зазор, м.

	V1	V2	
	116,67	83,33	0,29
$H, \text{ м}$	3,5	3	

Таким образом, при заданных исходных данных был выбран окончательный маршрут велодорожки А-Б (рис. 4). Следующим этапом является определение параметров размещения дополнительной инфраструктуры [5]:

– разметка места пересечения проезжей части (1) на пересечениях ул. Академика Байкова и Тихорецкого пр., Тихорецкого и Северного пр., а также выездах из торгового центра В1, В2 и В3 (рис. 5);

– обозначение велосипедной дорожки на всех участках движения (2);

– обозначение буферной зоны на участке автомобильной дороги (3);

– установка дорожных знаков типов 4.4.1 на пересечении улицы Академика Байкова и знаков типов 5.11.2 и 5.12.2 на участке автомобильной дороги (таблица).

Дорожные знаки типов 4.4.1 на пересечении улицы Академика Байкова и типов 5.11.2 и 5.12.2 на участке автомобильной дороги

4.4.1		Велосипедная дорожка
5.11.2		Дорога с полосой для велосипедистов
5.12.2		Конец дороги с полосой для велосипедистов

Главная задача эффективного городского управления – это создание удобной городской среды, рациональное распределение материальных ресурсов и обеспечение комфортной городской жизни. Для этого необходим широкий анализ больших исходных данных, на основе которых будут приниматься управленческие решения. Беспилотные системы – эффективный инструмент получения исходных данных для последующего анализа и создания картографического материала. Основная цель создания новых велосипедных дорожек: объединение ве-

лосипедной и городской транспортной инфраструктуры, для обеспечения безопасности перемещения пассажиров и возможности удобно перемещаться в нужную часть города. На данный момент множество велосипедных маршрутов Санкт-Петербурга не обладают целостностью, необходимой для ежедневного использования велосипеда как альтернативного вида транспорта. В работе была рассмотрена возможность применения БПЛА для создания участка велосипедной дорожки, который обеспечивает перемещение от существующих участков велодорог.

Проектируемая велосипедная дорожка состоит из двух участков, на первом из которых велосипедная дорожка расположена на пешеходной зоне, не доставляя неудобств перемещению. Второй участок велодорожки проходит по проезжей части. Сужение полос движения автомобилей позволяет проектировать дополнительную велосипедную полосу, однако необходим более глубокий анализ интересующего участка, для получения действительной информации об интенсивности движения на заданном участке дороги.

Библиографический список

1. СПб ГКУ «Городской центр управления парковками Санкт-Петербурга». URL: <http://gcup.spb.ru/velodorozhki/marshruty-velodorozhek/> (дата обращения: 26.10.2020);
2. Интерактивная карта велосипедных дорожек. URL: <https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/?ll=30.433072%2C59.912538&mode=usermaps&source=constructorLink&um=constructor%3Ah92gLWYylwuQhhC7bb9pT9Q00B6VhNG&z=10> (дата обращения: 26.10.2020).
3. Применение БПЛА. URL: <http://skvot.2035.university/primenenie-bpla-dlya-upravleniya-gorodskoj-sredoj> (дата обращения: 26.10.2020).
4. ГОСТ 33150-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование пешеходных и велосипедных дорожек. Общие требования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200123908> (дата обращения: 26.10.2020).
5. ГОСТ Р 51256-2011. Технические средства организации дорожного движения. Разметка дорожная. Классификация. Технические требования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-51256-2011> (дата обращения: 26.10.2020).

УДК 303.094.7

Н. В. Иванов*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКОВ

Рассмотрены подходы к построению имитационной модели пассажиропотоков, процесс моделирования на примере вестибюля метро, связь моделирования с теорией массового обслуживания.

Ключевые слова: пассажиропоток, теория массового обслуживания, имитационное моделирование.

N. V. Ivanov*

Postgraduate Student

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SIMULATION MODELING AS A TOOL FOR PASSENGER TRAFFIC RESEARCH

Approaches to building a simulation model of passenger traffic are considered, the simulation process is based on the example of a metro lobby, and the relationship between simulation and Queuing theory is considered

Keywords: passenger traffic, Queuing theory, simulation modeling.

Имитационное моделирование (симуляция) – это распространенная разновидность аналогового моделирования, реализуемого с помощью набора математических средств, специальных компьютерных программ симуляторов, позволяющих создавать в памяти компьютера процессы аналогии, с помощью которых можно провести целенаправленное исследование структуры и функций реальной системы в режиме ее «имитации», осуществить оптимизацию некоторых ее параметров.

Перемещения людей в потоках высокой интенсивности, особенно в зонах прохода через рамки металлоискателей, турникеты, в местах ожидания какого-либо транспортного средства, обслуживание в кассовых аппаратах и т. д. – можно описать на основе теории массового обслуживания (ТМО). Процессы, моделируемые на основе этой теории, обычно сводятся к задаче определения максимального количества «заявок», которое может обслужить система за промежуток времени. Заявка подразумевает появление одного человека (клиента) в системе массового обслуживания.

На сегодняшний момент теория массового обслуживания – это один из основных методов анализа работы процессов самых различных систем: экономических, технологических, социальных и т. д. [1]. С помощью систем массового обслуживания можно просто и наглядно описать многие реальные процессы, например: рабо-

та сортировочных железнодорожных станций; досмотр пассажиров при входе в аэропорты, вокзалы, метро; покупка билетов в кассах, различные объекты сферы обслуживания (банки, магазины, поликлиники, парикмахерские), промышленные предприятия.

То есть при помощи этой теории появляется возможность определить максимальную пропускную способность системы обслуживания. С помощью ТМО также можно определить очередь, которая образуется на пункте обслуживания по истечению некоторого времени.

Любая система массового обслуживания обрабатывает входящий поток заявок. Заявками являются автомобили на автомойке, клиенты в парикмахерской, заказы на производство некоторых изделий, люди, обслуживаемые в билетных кассах и многие другие процессы. Заявки поступают в систему в случайные моменты времени, но можно определить среднюю интенсивность их поступления.

Рассмотрим кассу по продаже жетонов на станции метрополитена, пусть τ – некоторый промежуток времени работы кассы, а поток клиентов (покупателей жетонов), есть простейший поток с интенсивностью $\lambda (\lambda > 0)$. Покупатели, поступившие в систему, либо покупают жетон – обслуживаются, если касса свободна, либо становятся в очередь и ожидают. Примем время обслуживания одного человека равным $T (T > 0)$. Таким образом, работа одной кассы описывает-

ся с однолинейной системы массового обслуживания (СМО) с ожиданием и максимальной длиной очереди M – максимальным числом покупателей, которое может вместить вестибюль [2].

Пусть максимально возможная очередь равна $M(M>0)$, каждый человек в очереди занимает одинаковое количество места – ячейку, при окончании обслуживания одного, вся очередь продвигается вперед на одну ячейку.

Подсчитаем, сколько людей сможет купить жетоны за время работы кассы – τ . За единицу времени одной кассой может воспользоваться T^{-1} человек, т. е. за время работы кассы:

$$N = \left[\tau T^{-1} \right], \quad (1)$$

где N характеризует пропускную способность одной кассы.

Рассмотрим процесс образования очереди за время обслуживания одного клиента, то есть в моменты времени nT , $n = 0, N$, периоды начала и конца обслуживания запроса. Обозначим через $p(i^n)$ вероятности того, что в момент времени T (сразу после ухода человека из очереди), длина очереди равна i человек $[n = 0, N, i = 0, M]$.

Через $P_i(t)$ обозначим вероятность того, что за время t в систему придут i человек.

Выражение $P_i(t)$ вычисляется по закону Пуассона и имеет вид

$$P_i(t) = e^{-\lambda t} \left(\frac{(\lambda t)^i}{i!} \right), i \geq 0, \quad (2)$$

где λ – интенсивность входного потока.

Процесс моделирования системы массового обслуживания проходит аналогично основным этапам моделирования сложных систем. Сущность моделирования систем массового обслуживания состоит в проведении исследований на компьютере моделью этой системы. Модель представляет собой некоторую компьютерную программу, которая описывает поведение составляющих системы под воздействием различ-

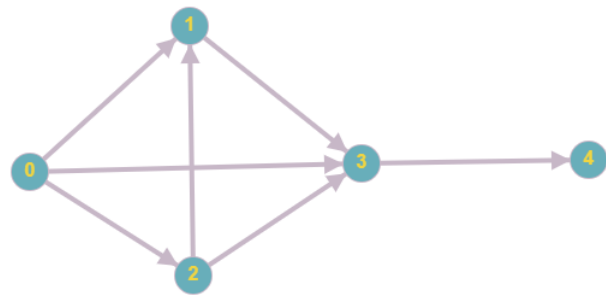


Рис. 1. Граф перемещения пассажиров

ных внешних факторов. Процессы, происходящие в системе, описываются на основе реальной информации о моделируемом объекте. При выяснении новых обстоятельств о работе объекта, модель пересматривается и уточняется, с учетом новой информации, т. е. моделирование является итерационным процессом [3].

В качестве примера рассмотрим работу вестибюля метрополитена, создадим несложную имитационную модель в среде AnyLogic [4].

Схема движения пассажиров в модели представлена на рис. 1: 0 – вход в вестибюль (генерация пассажиров по закону Пуассона); 1 – кассы для покупки билетов; 2 – место досмотра багажа; 3 – турникеты; 4 – перрон (место выхода из модели).

В модели имеются кассы с 4 сервисами обслуживания, досмотровая зона может обслуживать всего одного человека за раз, турникеты имеют 6 пропускных пунктов. Время обслуживания в кассах будет колебаться от 20 до 30 с. Время задержки на турникетах 1–3 с. Данную модель схему протестируем на пропускную способность при разных пассажиропотоках. Изменения пассажиропотока по времени показаны на рис. 2, изменения происходят каждые 10 мин модельного времени. Пример работы модели показан на рис. 3.

☐ Загружается из базы данных

Начало	Конец	Значение
0:00	0:10	1000.0
0:10	0:20	1250.0
0:20	0:30	1500.0
0:30	0:40	1750.0
0:40	0:50	2000.0
0:50	1:00	2250.0

Рис. 2. Изменения пассажиропотока

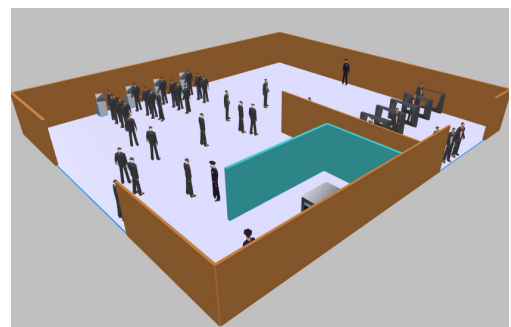


Рис. 3. Пример имитации

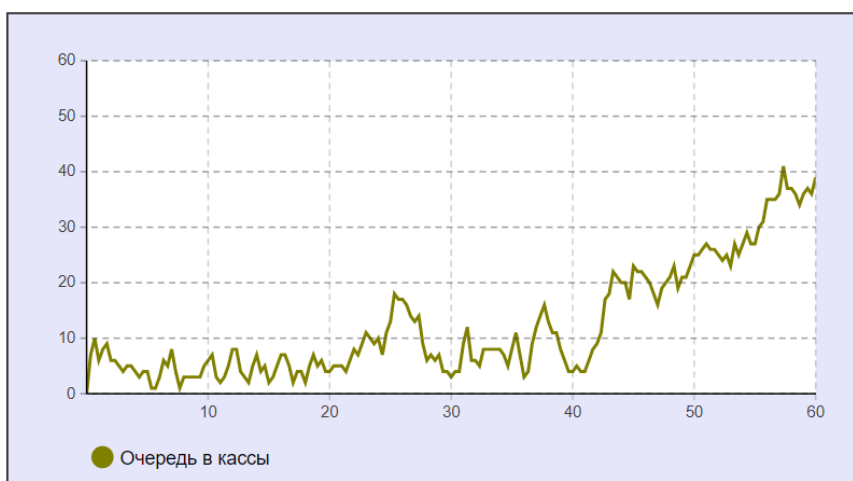


Рис. 4. Размер очередей в кассы от времени (имитация № 1)



Рис. 5. Размер очередей в кассы от времени (имитация № 2)

В результате получаем следующие данные по размерам очередей в кассах (суммарно по всем сервисам обслуживания), до 20 мин модельного времени, при потоке до 1,5 тысячи человек, не наблюдается роста очередей, они составляют до 10 человек, т. е. по 2–3 человека на кассу. С 20-й по 30-ю минуты есть некоторый рост размера очередей, при 1,75 тысячи человек в час, явное проявление того, что четырех кассовых аппаратов не хватает, происходит при пассажиропотоке от 2000 человек, т. е. после 40-й минуты модельного времени, причем такие результаты получились во всех прогонах модели, графики двух имитаций показаны на рис. 4; 5. Значит макси-

мальные возможности пропускной способности представленного вестибюля – 2000 человек в час.

Библиографический список

1. Гасников А. В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. 2013. 429 с.
2. Майоров Н. Н., Фетисов В. А. Моделирование транспортных процессов. СПб.: ГУАП, 2011. 164 с.
3. Майоров Н. Н., Фетисов В. А. Практические задачи моделирования транспортных систем. СПб.: ГУАП, 2012. 186 с.
4. Григорьев И. AnyLogic за три дня. 2017. 273 с.

УДК 656.073.235

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-103-106

В. А. Кляпко*

магистрант

Н. А. Слободчиков*

кандидат военных наук, профессор

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ВНЕДРЕНИЕ СКЛАДНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ «4FOLD» В ПЕРЕВОЗОЧНЫЙ ПРОЦЕСС

Рассматривается анализ контейнерооборота РФ, внедрение складных контейнеров 4FOLD в перевозочный процесс, преимущества данной инновации, а также методика складирования и формирования контейнерных связок.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, статистика контейнерооборота, складные контейнеры.

V. A. Klyapko*

Postgraduate Student

N. A. Slobodchikov*

PhD, Military, Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INTRODUCTION OF FOLDING CONTAINERS «4FOLD» IN THE TRANSPORTATION PROCESS

This article examines the analysis of container turnover in the Russian Federation, the introduction of folding containers 4FOLD in the transportation process, the advantages of this innovation, as well as the method of storage and formation of container bundles.

Keywords: container transportation, statistics of container turnover, folding containers.

С середины прошлого века контейнерами перевозятся огромное количество грузов различной номенклатуры, это обуславливается прежде всего тем, что это перевозки грузов в укрупненных грузовых модулях, позволяющие механизировать погрузочно-выгрузочные операции; кроме того, сократить трудозатраты, на всех этапах перевозочного процесса; уменьшить простои транспортных средств, а также целом уменьшить себестоимость перевозки грузов на всех видах транспорта. Ежегодный прирост масштабов таких перевозок во многих регионах составляет 17–25% и более.

В настоящее время в контейнерах возят не только тарные и штучные, но и жидкие, сыпучие, газообразные грузы, причем перевозки осуществляются как в специализированных, так и в универсальных контейнерах. В современной экономике государств контейнерные перевозки играют значительную роль, так как позволяют уменьшить объемы складских запасов, сделать более эффективным не только производственный процесс, но и процесс распределения и потребления товаров.

Откуда бы не поступали грузы в контейнерах, все основные контейнерные потоки начи-

наются и заканчиваются на контейнерных терминалах, которые формируют их основные параметры: типы и характеристики контейнеров, в которых перевозятся грузы, размеры транспортных партий, тип контейнерных отправок, время отправления транспортных партий и т. д. [1].

Российская Федерация, имея уникальное географическое положение, активно участвует в мировой системе контейнерных перевозок. Анализ рынка контейнерных перевозок РФ, позволяет сделать вывод о том, что в январе-октябре 2020 г. он вырос на 10,1% по сравнению с аналогичным периодом прошлого года – до 4,747 млн TEU.

Согласно данным компании *Fesco*, экспорт вырос на 11% – до 1,555 млн TEU, внутренние перевозки – на 12%, до 844 тысяч TEU, транзит – на 51%, до 589 тысяч TEU. В то же время импорт остался практически на уровне прошлого года – 1,759 млн TEU (рис. 1). Кроме того, аналитики компании отмечают, что, в октябре 2020 г. рынок вырос на 16% по сравнению с октябрём 2019 г. – до 540 тысяч TEU. При этом объём транзитных перевозок вырос на 54% по

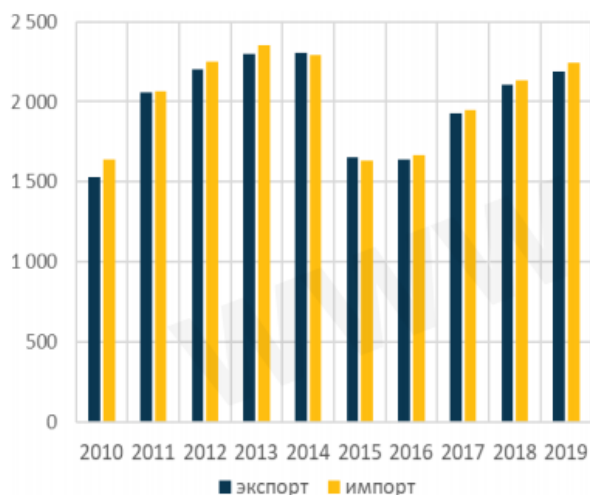


Рис. 1. Динамика контейнерных перевозок через порты РФ, тысячи TEU

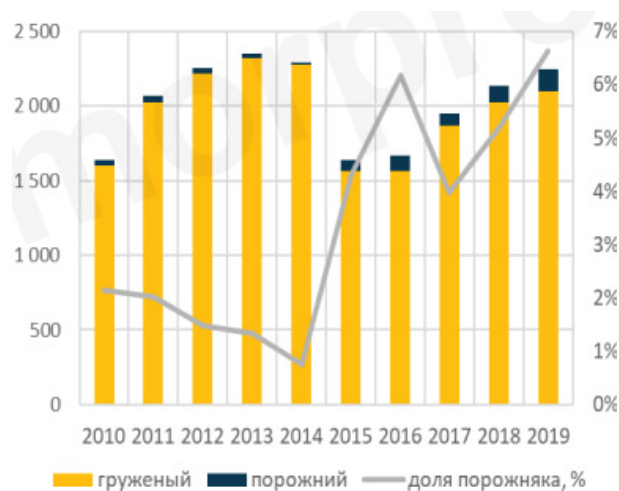


Рис. 2. Соотношение груженых и порожних контейнеров в импорте, тысячи TEU

сравнению с октябрем 2019 г. Впервые с начала года увеличились объемы перевозок из Средней Азии в Азию. Экспортные отгрузки увеличились на 15%. Основной рост по-прежнему приходится на перевозки через сухопутные пограничные переходы РФ с Китаем и Дальний Восток России. Вместе с тем внутренние перевозки увеличились на 12% за счет роста отправок на направлениях из Москвы. Импортные отгрузки выросли на 9%, основной рост также приходится на отправки через Дальний Восток России [2].

В то же время, несмотря на положительные тенденции, контейнерные перевозки имеют и ряд существенных недостатков, так, например, не только специальные и специализированные контейнеры, но и достаточно большая часть универсальных контейнеров следуют, как правило, обратно в порожнем состоянии, в тоже время занимают столько же места на транспортном средстве, как и груженые. В настоящее время 20% контейнеров, транспортируемых по морю и 40% по суше, перевозятся без груза (рис. 2).

В чем негатив данного состояния дел, прежде всего, в дополнительном негативном воздействии на окружающую среду, снижение прибыли компаний, повышение транспортных издержек и, в конечном счете, увеличении финансовой нагрузки на конечного потребителя. Как отмечалось, в разработанной в декабре 2019 г. Еврокомиссией, программе перехода к климатической нейтральности континента к 2050 г. (Европейская зеленая сделка «European Green Deal»), в ближайшие годы ожидается серьезный рост выбросов CO₂ [3].

На наш взгляд, одним из способов уменьшения негативного влияния на климат и эконо-

мику перевозок порожних контейнеров может стать широкое использование складного транспортного контейнера 4FOLD. Внедрение данной технологии позволит, прежде всего, сэкономить полезную площадь транспортного средства, для перевозки груженых контейнеров. Данное преимущество возможно благодаря конструкции данных универсальных контейнеров, четыре таких порожних контейнера занимают столько же места, сколько и один стандартный груженный контейнер (рис. 3).

Данный складной контейнер 4FOLD является продуктом компании «HCI» (Holland Container Innovation), дочерней компанией Делфтского технологического университета в Нидерландах. Эта компания разработала данный, полностью сертифицированный по стандартам ISO и CSC контейнер в 2013 г. С 2015 г. его начинают использовать на судоходных линиях по всему миру. Европейский Союз в 2016 г. включил складной контейнер 4FOLD в программу исследований и инноваций Horizon 2020. В результате этой поддержки со стороны Европейского Союза и соответствующих финансовых вложений HCI создала производственную линию, по выпуску 4FOLD в больших масштабах. С 2019 г. компания HCI начинает активное сотрудничество между судоходными линиями и грузоотправителями по использованию складных контейнеров на «выделенном маршруте» для повышения эффективности перевозок и сокращения негативных выбросов в атмосферу [4].

В чем заключается преимущество данного контейнера:

– прежде всего, снижаются транспортные издержки на перевозку пустого контейнера, так



Рис. 3. Штабель из 4 контейнеров 4FOLD

как для перевозки 4 контейнеров требуется одно «контейнероместо». Другими словами, вместо 4 полуприцепов, вагонов и т. д. нужно всего одно транспортное средство (место, если говорить о водном виде транспорта). Кроме того, при хранении порожних контейнеров данного типа на терминалах и складах экономия места будет еще более существенной, в зависимости от местных условий (силы господствующего ветра, несущей способности площадки и т. п.). Таким образом, они будут приносить мультипликационный эффект, так как меняются все параметры цепей поставок (увеличение объема перевозки груженых контейнеров и т. д.).

— также важным является при этом и побочный экологический эффект за счет сокращения суммарного количества транспортных средств, для тех же объемов перевозок. По предварительным условным разным подсчетам, при использовании данной технологии в цепочке поставок, объем выбросов CO₂ в атмосферу снизиться до 37% [5].

Данные преимущества окупают дополнительные капитальные расходы, связанные с увеличением стоимости производства контейнеров, а также эксплуатационные расходы, связанные необходимостью проведения операций по складыванию и раскладыванию контейнеров, перегрузкой в них грузов (рис. 4–6).

При этом схема цепи возвращения порожних контейнеров из терминала выгрузки до терминала погрузки складного контейнера 4FOLD в настоящее время выглядит следующим образом (рис. 7). От склада отправителя до порта перевозка 4 порожних контейнеров осуществляется на автомобильном транспорте, далее перегрузка на линейное судно и следования до порта назначения, дальнейшая погрузка на автомобильный транспорт и следование до терминала

Такая организация позволит существенно изменить организацию перевозок грузов, как с использованием линейного судоходства, так и при сухопутной организации перевозок при условии скорейшей разработки МТУ (местных техниче-

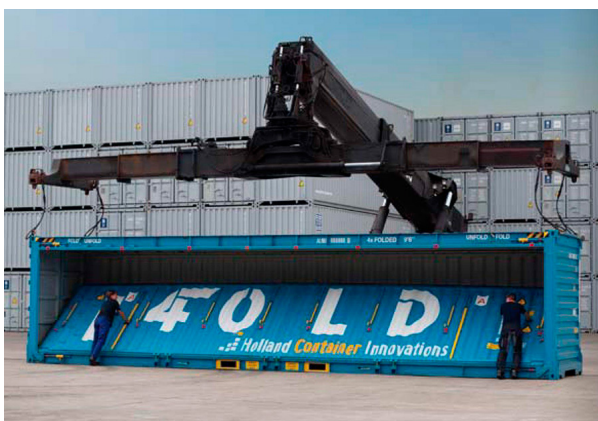


Рис. 4. Складывание бортов



Рис. 5. Складывание торцов и крыши



Рис. 6. Трансформация с уменьшением объема



Рис. 7. Цепь организации перевозок порожних контейнеров типа 4FOLD

ских условий) для них. В этом случае круг использования такой технологии существенно увеличится. Тем более, что в груженом состоянии перевозка не требует дополнительных согласования и может осуществляться по железным дорогам согласно техническим условиям.

Библиографический список

1. Маликов О. Б., Коровяковский Е. К., Коровяковская Ю. В. Проектирование контейнерных терминалов: учеб. пособие. СПб.: ПГУПС, 2015. 52 с.
2. Статистические данные контейнерного грузооборота в Российской Федерации за 2019–2020 гг. URL: <https://www.fesco.ru/ru/assets/containers> (дата обращения: 07.12.2020).
3. Информационно-аналитический журнал для профессионалов «Региональная энергетика и энергосбережение». URL: <https://energy.s-kon.ru/novaya-zelenaya-sdelka-evropejskij-soyuz-stavit-tsel-stat-klimaticheskij-nejtralnyj-k-2050-godu> (дата обращения: 08.12.2020).
4. Официальный сайт компании «HOLLAND CONTAINER INNOVATIONS NEDERLAND». URL: <https://4foldcontainers.com/about-us> (дата обращения: 08.12.2020).
5. Слободчиков Н. А., Елисеев Ю. П. Особенности организации государственных перевозок в условиях функционирования полигонного центра управления перевозками // Проблемы организации перевозочного процесса при выполнении воинских перевозок: сб. ст. межвузов. науч.-практ. конф. СПб.: МОБИЖДви-ВОСО ВАМТО, 2017. С. 79–87.

УДК 656.025.4

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-107-114

Т. В. Кропачев*

магистрант

С. В. Уголков*

кандидат военных наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

Рассматриваются вопросы организации перевозки опасного груза, а именно – промышленная перевозка тринитротолуола (ТНТ) из Санкт-Петербурга в Кировск Мурманской области. Проводится анализ технологии перевозки ТНТ как груза повышенной опасности, а также анализ специализированного подвижного состава для каждого вида транспорта. Рассматриваются технологические схемы перевозки ТНТ автомобильным, железнодорожным и смешанным (морской и автомобильный) видами транспорта. На основе сравнительного анализа экономических и временных характеристик маршрутов определяется оптимальный маршрут перевозки.

Ключевые слова: промышленные взрывчатые вещества, опасный груз, груз повышенной опасности, перевозка опасного груза, перевозка груза повышенной опасности.

T. V. Kropachev*

Postgraduate Student

S. V. Ugolkov*

PhD, Military, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

FEATURES OF THE ORGANIZATION OF HIGH-RISK CARGO TRANSPORTATION

The article deals with the organization of the transportation of dangerous goods, namely the industrial transportation of trinitrotoluene (hereinafter TNT) from St. Petersburg to Kirovsk, Murmansk region. The analysis of TNT transportation technology as a high-risk cargo, as well as the analysis of specialized rolling stock for each type of transport is carried out. The technological schemes of TNT transportation by road, rail and multimodal (sea and road) modes of transport are considered. On the basis of a comparative analysis of the economic and time characteristics of the routes, the optimal transportation route is determined.

Keywords: industrial explosives, dangerous goods, high-risk cargo, transportation of dangerous cargo, transportation of high-risk cargo.

Введение

Взрывчатые материалы (ВМ), помимо военного дела, нашли широкое применение и во многих отраслях народного хозяйства. Взрывчатые материалы и вещества промышленного назначения – это взрывчатые вещества или материалы, разрабатываемые и изготавливаемые для использования энергии взрыва в промышленных или иных мирных целях. Так, основными направлениями мирного применения ВМ и веществ являются: горное дело и строительство. В горном деле ВМ используются для вскрытия и эксплуатации месторождений. К тому же существует взрывной способ обработки металлов. В строительстве же ВМ используют для прокладки автомобильных и железнодорожных магистралей, водных каналов, газо- и нефтепро-

водов, при проходке тоннелей, шахтных стволов [1]. Также для сноса зданий и сооружений. Особенно эффективно применение ВМ в труднодоступных для техники местностях. Таким образом, ВМ имеют широкий спектр применения в мирных целях.

В Мурманской области возле Апатитов увеличивается количество шахт и рудников, а предприятия по производству взрывчатых веществ еще только в планах, но предприятия по производству средств инициирования (далее СИ) имеются. Таким образом, возникает необходимость в транспортировке именно ВВ.

Общие условия перевозки ВМ

К общим условиям перевозки ВМ относятся: порядок приема ВМ к перевозке и выдачи по-

лучателям, общие положения транспортирования и хранения, оформление перевозочных документов, меры санитарной и противопожарной безопасности.

Специальные условия перевозки относятся к отдельным классам грузов в соответствии с их особенностями и свойствами.

При приеме ВМ к перевозке необходимо проверить соответствие его состояния, массы, упаковки и маркировки правилам перевозки, государственным стандартам и техническим условиям [2].

При предъявлении ВМ к перевозке должен быть предъявлен комплект документов, который требуется для конкретной автомобильной, морской или железнодорожной перевозки, а также представлена следующая информация об опасном грузе:

- надлежащее наименование опасного груза;
- номер ООН опасного груза;
- класс и подкласс опасности, виды дополнительной опасности;
- группа упаковки;
- номер образцов опасности;
- классификационный код.

Промышленная перевозка ТНТ может осуществляться на всех видах транспорта, за исключением гражданской авиации, а осуществляется она в соответствии с действующими на каждом виде транспорта правилами перевозки опасных грузов. Так как ТНТ является опасным грузом, то для него характерно применение дополнительных мер противопожарной и общей безопасности.

Основная документация для каждого вида транспорта, содержащая меры обеспечения безопасности при транспортировке ТНТ как груза I класса опасности:

- номер ООН – 0209;
- номер аварийной карточки, содержащей меры безопасности при аварии на железнодорожном транспорте – 111;
- код экстренных мер при пожаре на автомобильном транспорте – 1;
- код экстренных мер, распространяющихся на перевозку тротила автомобильным транспортом – 24Э.

Требования к осуществлению погрузочно-разгрузочных работ (далее ПРР) на каждом виде транспорта имеют жесткие правила и условия, как к самому мероприятию, так и к персоналу, для допуска и выполнения таких работ, конкретно с ними можно ознакомиться в нормативной документации такой как «ДОПОГ», «МОПОГ» и «Правила перевозки опасных грузов по железным дорогам».

Технология перевозки ТНТ автомобильным видом транспорта

Автомобильный транспорт эффективнее всего использовать для перевозки ВМ на небольшие расстояния.

Перевозка тротила автомобильным транспортом осуществляется в соответствии с Правилами транспортировки грузов автомобилями от 15.04.2011 г. № 272, Федеральным законом от 08.11.2007 г. «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта», а также Европейским соглашением о международной дорожной перевозке опасных грузов ДОПОГ).

Согласно ДОПОГ тротил относится к грузам повышенной опасности и к нему применимы особые условия перевозки. Таким образом, для транспортировки тротила необходимо использовать специализированное транспортное средство, а также специализированную тару.

Грузоотправитель обязан подготовить тротил к транспортировке так, чтобы обеспечить сохранность груза и безопасность при транспортировании. Упаковка должна соответствовать нормативной документации (ГОСТ 26319-84), а именно – быть исправной, закрыта, а также иметь соответствующую маркировку. Каждая грузовая тара обязана иметь маркировку согласно ГОСТ 19433-88 «Грузы опасные. Классификация и маркировка». Материалы и способы маркировки должны соответствовать ГОСТ 14192-77 «Маркировка грузов».

Маршрут перевозки тротила согласовывается с органами ГИБДД и Минтрансом. Также необходимо получить специальное разрешение на перевозку, так как тротил относится к категории повышенной опасности.

Водитель транспортного средства должен иметь профессиональную пригодность, специализированную квалификацию и обладать знаниями требований ДОПОГ, а также обязан соблюдать настоящие Правила дорожного движения.

Технология перевозки ТНТ железнодорожным транспортом

В Российской Федерации перевозка опасных грузов железнодорожным транспортом регламентируется Правилами перевозок опасных грузов по железным дорогам.

«К перевозке по железным дорогам допускаются опасные грузы, поименованные в Алфавитном указателе опасных грузов, допущенных к перевозке железнодорожным транспортом и в Перечне опасных грузов класса 1» [3].

Если перевозка осуществляется в крытом вагоне, для некоторых видов опасного груза характерно требование перекраски вагона в желтый цвет.

Специализированные вагоны, которые принадлежат предприятиям, организациям или учреждениям и предназначены для перевозки ВМ, размещения специалистов и охраны, допускаются к обращению по железнодорожным путям, входящим в общую сеть железных дорог, в соответствии с Инструкцией «О порядке курсирования по железнодорожным путям общего пользования вагонов, принадлежащих предприятиям и организациям министерств и ведомств» [3]. На всех вагонах, тарах и упаковках должна быть нанесена специальная маркировка.

Технология перевозки ТНТ морским транспортом

Перевозка опасных грузов морским транспортом регламентируется следующими нормативными документами:

- правилами морской перевозки опасных грузов (МОПОГ), изложенными в двух томах;
- Международным кодексом морской перевозки грузов (МК МПОГ);
- Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море (СОЛАС 74);
- рекомендациями Организации объединенных наций (ООН) по перевозке опасных грузов.

Учитывая изложенные требования в нормативной документации, перевозка ТНТ морским транспортом должна осуществляться в специализированной упаковке, изготовленной из инертных материалов, также упаковка должна быть герметичной и обеспечивать сохранность

груза от воздействия внешней среды и иметь специальную маркировку.

«На судне, выполняющем перевозку, должна находиться опись опасного груза, манифест и грузовой план, в котором обозначается техническое наименование, характеристика и места расположения груза. К комплекту документов прилагается подписанное свидетельство о том, что груз имеет надлежащую упаковку и маркировку» [4].

Транспортировка воздушным транспортом

Перевозка ТНТ гражданской авиацией на территории России запрещена, так как ТНТ является взрывчатым, брызгавым веществом и относится к категории повышенной опасности и данную транспортировку могут осуществлять лишь Вооруженные Силы Российской Федерации в собственных целях.

Технологические схемы перевозки ТНТ

В данной статье, помимо общих вопросов, рассматривается конкретная задача организации перевозки ТНТ (с годовым грузооборотом 3000 т) из Санкт-Петербурга в Кировск. Для реализации данной перевозки предлагается рассмотреть и проанализировать три возможных маршрута перевозки.

Маршрут № 1. Первый маршрут перевозки тринитротолуола – это автомобильная транспортировка из Санкт-Петербурга в Кировск (Мурманская область). Расстояние от пункта отправления до пункта назначения составляет 1220 км. Время, затраченное на перевозку одной партии, составит 2 дня. Данный маршрут представлен на рис. 1.

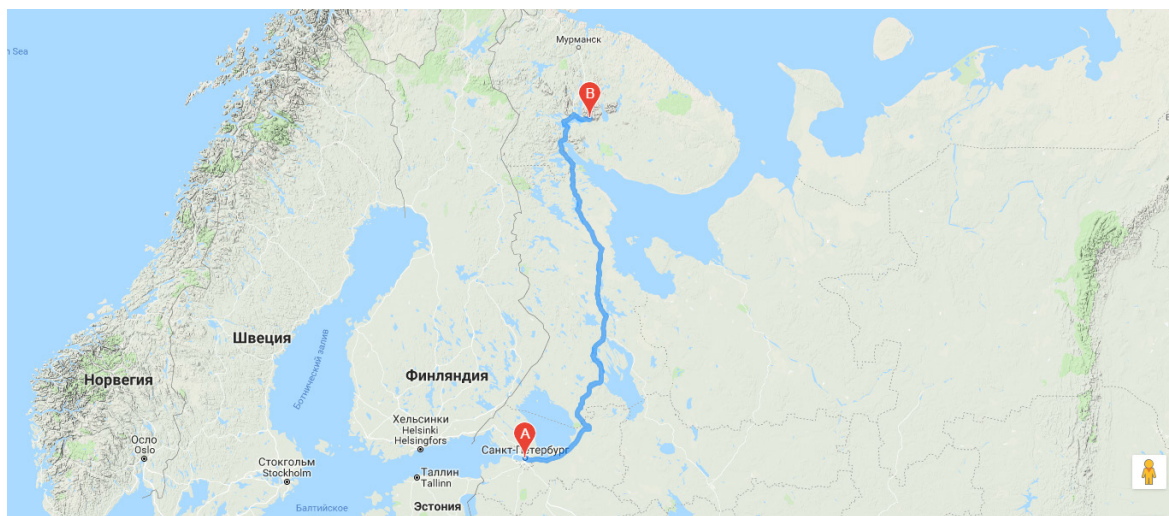


Рис. 1. Маршрут следования груза из Санкт-Петербурга в Кировск

Согласно требованиям ДОПОГ, данный маршрут должен быть согласован с ГИБДД и Минтрансом, так как осуществляется транспортировка груза повышенной опасности. Также ГИБДД МВД России могут потребовать участие автомобиля сопровождения для данной перевозки или выделить патрульный автомобиль ГИБДД для сопровождения. Сопровождение и охрана являются обязательными, если происходит транспортировка колонной.

Для маршрута № 1 будет представлен следующий автомобиль. Автомобиль-фургон марки КАМАЗ 65115 типа ЕХ/ІІІ по ДОПОГ. Комплектация транспортного средства выполнена со-

гласно всем требованиям ДОПОГ. Также ТС имеет специальное разрешение на перевозку взрывчатых материалов (рис. 2).

Маршрут № 2 – это железнодорожная перевозка до склада предприятия. Основная часть перевозки – это транспортировка из Санкт-Петербурга в Титан (рис. 3). Расстояние данного маршрута составляет 1271 км. Время, затраченное на транспортировку, – 7 дней. Далее со станции Титан вагоны с грузом доставляются по подъездным путям до склада предприятия в Кировск.

Для железнодорожной перевозки по маршруту № 2 используется крытый вагон желтого цвета модели 11-280, показанный на рис. 4, а.



Рис. 2. КАМАЗ-65115

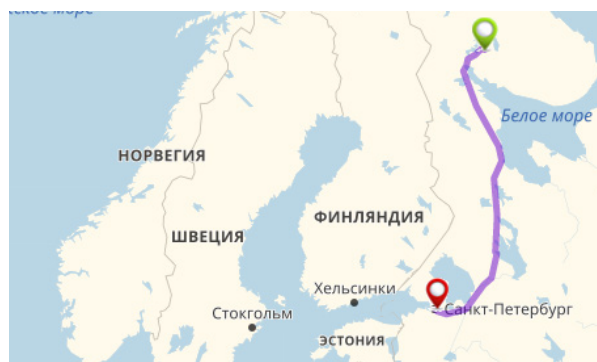


Рис. 3. Маршрут «Санкт-Петербург – Титан»

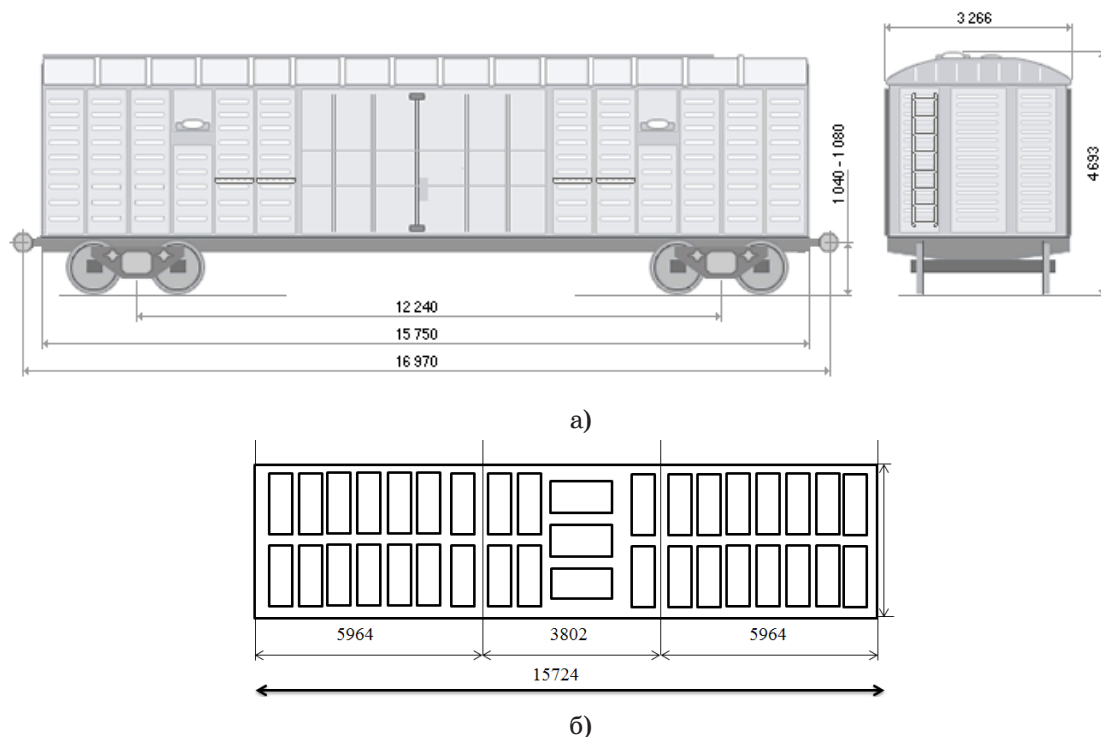


Рис. 4. Крытый вагон и схема укладки:

а – крытый вагон модели 11-280; б – схема укладки транспортных пакетов в вагон

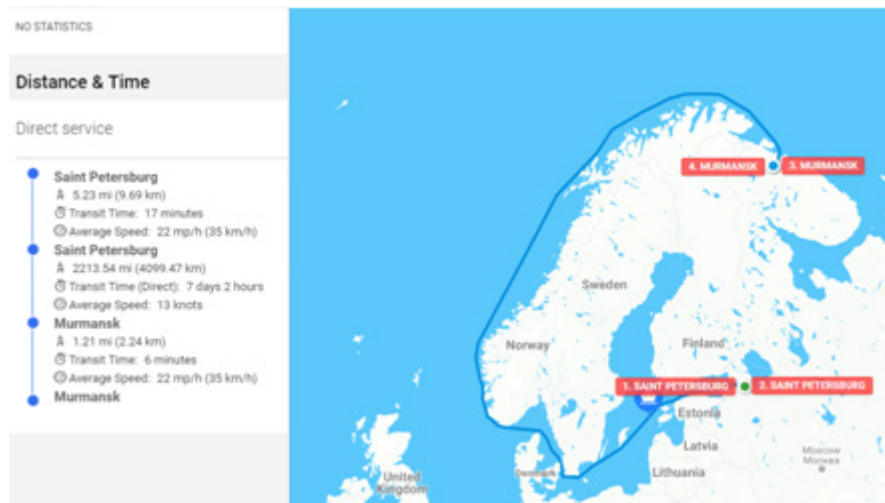


Рис. 5. Расстояние и время морской перевозки по данным searates.com

На рис. 4, б показана схема размещения укрупненных грузовых единиц в вагоне модели 11-280. Размеры поддонов транспортного пакета составляют 1200×800 мм. А внутренние размеры вагона составляют 2860×2764×15 724 мм. Также учтены размеры дверного проема и высота транспортного пакета. После укладки груз надежно крепится, чтобы не возникало аварийной ситуации из-за его перемещения, падения, нарушения целостности упаковки и т. п.

Таким образом, вагон вмещает 38 транспортных пакетов общим весом в 55 т, что удовлетворяет грузоподъемности вагона.

Маршрут № 3. Третий маршрут перевозки тринитротолуола из Санкт-Петербурга в Кировск состоит из морской транспортировки Санкт-Петербург – Мурманск. Расстояние маршрута морской перевозки составляет 2221 морские мили (4113 км). Время на транспортировку – 7 суток, согласно данным сервиса searates.com (рис. 5). С учетом ПРР и остановок на пунктах перегрузки время на транспортировку составит 13 суток. Плечо подвоза автомобильным транспортом Мурманск – Кировск (рис. 6).

Расстояние второй составляющей маршрута, а именно – автомобильной перевозки из Мурманска в Кировск составляет 210 км, время, затрачиваемое на данную транспортировку, составляет 4 ч.

Для перевозки ТНТ маршрутом №3 в качестве тары будет использоваться 20-футовый специальный контейнер (рис. 7, а).

Вторая часть данной перевозки (по маршруту № 3) это автомобильная транспортировка контейнера. Для осуществления данной транспортировки будет использоваться контейнеро-

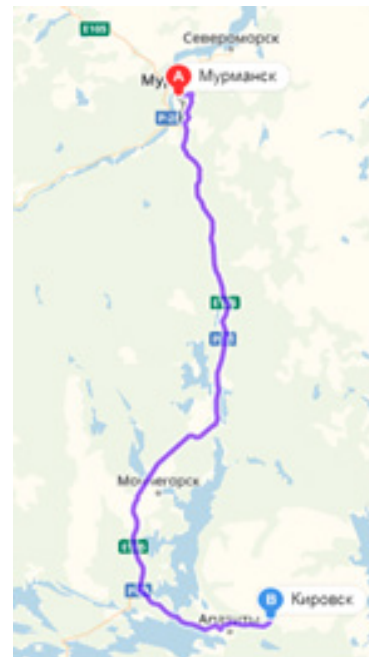


Рис. 6. Маршрут «Мурманск – Кировск»

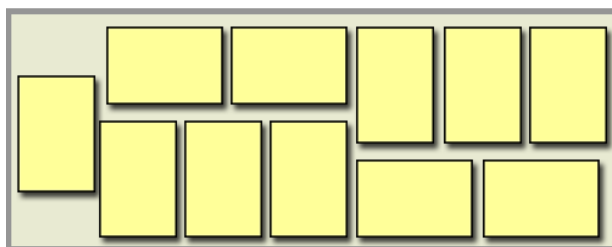
воз MERCEDES-BENZ 2543 (рис. 7, в). Данное транспортное средство соответствует категории ЕХ/ІІІ и оборудовано соответственно требованиям ДОПОГ.

Упаковка и маркировка

В качестве внешней тары для транспортировки ТНТ предлагается использовать крафт-бумажный четырехслойный мешок. Данные мешки упаковывают в наружную тару, которой является ящик из фибрового картона 4G, с максимальной грузоподъемностью 50 кг.



а)



б)



в)

Рис. 7. Транспорт и тара для маршрута № 3:
а – специальный 20-футовый контейнер;
б – схема укладки груза в контейнер;
в – MERCEDESBENZ 2543

Из коробок на евро-поддоне формируется транспортный пакет по 4 коробки в 1 ряду. Таким образом, высота транспортного пакета составляет 1800 мм (с учетом высоты паллеты) и вмещает 7 рядов, т. е. 28 коробок по 50 кг. Итого 1400 кг груза в одном транспортном пакете. С учетом веса паллеты транспортный пакет будет весить 1430 кг, что соответствует грузоподъемности паллеты (более 1500 кг). После укладки



а)



б)



в)

Рис. 8. Использованная тара: а – крафт-бумажный мешок; б – ящик 4G; в – транспортный пакет

на поддон, используя средства пакетирования (стретч-пленка, полимерные ленты, вспомогательные приспособления), формируется транспортный пакет. Все использованные виды тары и сформированная укрупненная единица показаны на рис. 8, в.

Общие требования к упаковке: упаковка должна быть прочной, надежной, обеспечивать полную сохранность груза. Внутренняя тара должна укладываться во внешнюю тару так, чтобы не происходило ее разрыва, прокола или утечки (россыпи) содержимого в наружную, в процессе перевозки. [5]

Маркировка и знаки опасности

Большие знаки опасности и маркировка должны быть нанесены на каждую транспортную единицу, перевозящую опасные грузы.

Маркировка наносится с указанием [6]:

- наименования взрывчатого вещества;
- марки;
- наименования или товарного знака предприятия-изготовителя;
- номера партии;
- номера места или поддона;



Рис. 9. Знаки опасности для ТНТ

- массы нетто в килограммах;
- массы брутто в килограммах;
- даты (месяца и года) изготовления;
- знака опасности груза по ГОСТ 19433 (для ТНТ черт. 1а, класс 1, подкласс 1.1, группа совместимости D); [7]
- условного номера (для ТНТ число 144) в равностороннем треугольнике.

На каждую наружную упаковку наносится разборчивый и долговечный маркировочный знак, указывающий номер ООН, отгрузочное наименование, написанное на нескольких языках, одним из которых должен быть английский, немецкий или французский, массы нетто в килограммах. Также все маркировочные знаки на упаковке должны быть ясно видимыми и разборчивыми, и соответственно выдерживать воздействие любых погодных условий без снижения качества надписи.

«Знаки опасности наносятся на каждую наружную тару рядом с отгрузочным наименованием так, чтобы никакая часть или компонент тары и никакой другой знак или другие маркировочные знаки не загромождали их» [8].

Знаки опасности для ТНТ показаны на рис. 9.

Сравнение показателей маршрутов

Результаты экономических и временных показателей каждого маршрута представлены в таблице. Объем перевозок за год составляет 3000 т груза. Цена одной тонны ТНТ оценивается в 43–44 000 р. Отношение цены перевозки к цене груза также приведены в таблице.

Экономические и временные показатели перевозки

Маршрут	Время перевозки одной партии, сутки	Стоимость перевозки одной партии, тыс. руб.	Стоимость перевозки за год, млн руб.	Цена перевозки/цена товара, %
№ 1	2	320	16,640	0,128
№ 2	7	1368	15,320	0,117
№ 3	13	703	27,020	0,207

Заключение

Исходя из полученных результатов (таблица), можно сделать вывод, что перевозка по маршруту № 2 будет экономически выгоднее. Однако по маршруту № 1 транспортировка будет менее выгодной, но более быстрой. В зависимости от выбранного приоритетного показателя оптимальным будет являться маршрут № 2, если приоритетным критерием является минимальная стоимость перевозки, и маршрут № 1, если в приоритете скорость доставки (минимальное время) перевозки.

Перевозка по маршруту № 3 является затратной как по времени, так и по стоимости. Такую большую стоимость перевозки данным маршрутов можно объяснить тем, что используется большое количество 20-футовых контейнеров. Казалось бы, можно оптимизировать перевозку (по стоимости) используя 40-футовые контейнеры, однако данная перевозка становится менее технологичной и более длительной, так как контейнер с весом груза более 16 т нельзя перевозить автомобильным транспортом категории ЕХ/ІІІ и контейнера приходится расформировывать в порту. В свою очередь, операции по расформированию контейнера и перевалке груза в порту могут и не выполняться, в связи с тем, что порт может вообще не осуществлять данные услуги или же может быть перегружен другими операциями. В любом случае выполнение дополнительных операций несет лишние временные и экономические затраты. И в итоге стоимость перевозки так или иначе дороже и дольше, чем другими маршрутами. Из вышесказанного можно сделать вывод, что тариф на перевозку данного груза на морском транспорте слишком высок из-за специфики груза (1 класс опасности) и крайне невыгоден в сравнении с перевозкой другими видами транспорта по скорости доставки.

Библиографический список

1. ГОСТ 32162-2013. Вещества взрывчатые промышленные. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200105692> (дата обращения: 10.09.2020).
2. Перевозка опасных грузов: учеб. пособие / А. В. Кириченко, Н. А. Слободчиков, О. А. Ражев, В. А. Фетисов. СПб.: ГУАП, 2011. 122 с.
3. Правила перевозок опасных грузов по железным дорогам. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902165571> (дата обращения: 10.09.2020).
4. РД 31.15.01-89. Правила морской перевозки опасных грузов (Правила МОПОГ). URL: <http://>

docs.cntd.ru/document/902010657 (дата обращения: 10.09.2020).

5. ГОСТ 26319-84. Грузы опасные. Упаковка. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200009554> (дата обращения: 10.09.2020).

6. ГОСТ 14192-96. Маркировка грузов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006710> (дата обращения: 10.09.2020).

7. ГОСТ 19433-88. Грузы опасные. Классификация и маркировка. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901714253> (дата обращения: 10.09.2020).

8. Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов. URL: https://rosavtotransport.ru/netcat_files/15/54/20190101_ADR_2019_vol1_R.pdf (дата обращения: 10.09.2020).

УДК 656.052.14

Е. И. Крылова*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ. «УМНЫЙ» СВЕТОФОР, «УМНЫЙ» ПЕРЕКРЕСТОК

Рассматриваются понятие интеллектуальной транспортной системы, ее цели и задачи, оборудование, за счет которого осуществляются данные цели и задачи, а также системы «умный» светофор и «умный» перекресток, которые относятся к интеллектуальным транспортным системам.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, дорожное движение, автомобили, безопасность дорожного движения, уменьшение заторов, умный светофор.

Е. I. Krilova*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS. SMART TRAFFIC LIGHT, SMART CROSSROADS

This article discusses the concept of an intelligent transport system, its goals and objectives, the equipment used to implement these goals and objectives, as well as the smart traffic light system and smart intersection, which are related to intelligent transport systems.

Keywords: intelligent transport systems, road traffic, cars, road safety, traffic congestion reduction, traffic accident, smart traffic light.

Введение

Транспорт является неотъемлемой частью жизни в современном мире, поэтому важно обеспечить надежное функционирование транспортной системы. Интеллектуальные транспортные системы – относительно новое направление, справедливо считающееся одним из самых эффективных инструментов для решения проблем транспорта. Интеллектуальные транспортные системы в России начали внедряться не так давно. На данный момент в планах по улучшению ситуации на дорогах является активное внедрение интеллектуальных транспортных систем, которые позволяют быстро выявлять ситуации, которые могут привести к затору, возникновению небезопасных условий, снижению мобильности, а затем помогают реализовать соответствующие стратегии и планы для ослабления последствий этих проблем, уменьшения их продолжительности и воздействия на передвижение.

Интеллектуальная транспортная система – это система, интегрирующая современные информационные, коммуникационные и телематические технологии, технологии управления и предназначенная для автоматизированного

поиска и принятия к реализации максимально эффективных сценариев управления транспортной системой региона (города, дороги), конкретным транспортным средством или группой транспортных средств, с целью обеспечения заданной мобильности населения, максимизации показателей использования дорожной сети, повышения безопасности и эффективности транспортного процесса, комфортности для водителей и пользователей транспорта [1].

Развитие современной транспортной системы невозможно осуществить без применения интеллектуальных транспортных систем.

Цели и функции ИТС

Основной целью построения ИТС является создание системы мониторинга и управления его транспортной системой в режиме реального времени для повышения качества транспортных услуг экономике и населению, снижения транспортных затрат, улучшения экологии и безопасности [2].

Цели создания ИТС на автомобильных дорогах:

- повышение уровня безопасности дорожного движения, выработка эффективных решений

с целью предотвращения ДТП и минимизация негативных последствий от произошедших ДТП;

- оптимизация условий движения транспортных потоков на автомобильных дорогах для повышения их пропускной способности и снижения риска возникновения ДТП;

- обеспечение высокого качества транспортного обслуживания всех пользователей;

- снижение вредного воздействия транспортного комплекса на экологическую систему;

- повышение эффективности функционирования транспорта и транспортной инфраструктуры;

- повышение качества планирования и управления в области транспортного комплекса и транспортной инфраструктуры;

- повышение эффективности контроля транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог;

- повышение эффективности работы по ликвидации ЧС и их последствий.

Задачей ИТС для современного транспорта является осуществление автоматического взаимодействия субъектов транспортной инфраструктуры.

ИТС включает в себя оборудование и исполнительные элементы (детекторы транспортных потоков, автоматические дорожные метеостанции, информационные табло, знаки переменной информации, телекамеры, дорожные световые контроллеры, пункты детекции скоростных режимов); центры управления дорожным движением; систему мониторинга и анализа транспортных потоков. Совокупность данных технологий помогает удовлетворить требования пользователей транспортной сети к качественному функционированию системы наземного транспорта.

«Умный» светофор

«Умный» светофор – это система динамического управления сигналами светофора, благодаря которой улучшается пропускная способность потоков УДС, а также повышается безопасность дорожного движения. Такой светофор работает не в заранее заданном постоянном строго определенном режиме, а переключает сигналы исходя из количества транспортных средств в каждом направлении.

Данная система включает в себя контроллеры, удаленные датчики движения и видеокамеры. Эти элементы в режиме реального времени отслеживают загруженность перекрестков и передают информацию о состоянии дорожного движения на центральный сервер управления.

Система «умный» светофор работает следующим образом: видеокамера или датчики устанавливаются на определенной высоте и над конкретным участком дороги, сигнал от датчика поступает в модуль обработки видеoinформации, затем в данном модуле происходит выделение движущихся транспортных средств и определение различных интегральных оценок, на основе этих показателей центральный сервер передает команду контроллерам светофоров включить красный или зеленый свет с определенной продолжительностью (циклом).

Системы видеоконтроля, ориентированные на транспорт, предоставляют данные следующих типов:

- 1) информация о трафике для статистической обработки:

- общее число обнаруженных автомобилей;
- скорость;
- ускорение транспортного потока;
- плотность потока;
- загруженность полос движения;
- классификация автомобилей.

- 2) информация о происшествиях на дороге:

- высокая скорость, плотность потока или занятость полос;
- наличие заторов или движения по встречной полосе;
- остановившиеся или медленно движущиеся автомобили;
- наличие на дороге подозрительных предметов;

- 3) информация о наличии/отсутствии автомобилей:

- наличие приближающихся автомобилей;
- наличие автомобилей, остановившихся на перекрестке;
- число автомобилей, проехавших через зоны обнаружения;
- измерение длины очереди.

Система внедрена в модуль управления светофорами благодаря этому согласовывается работа всех светофоров перекрестка в каком-либо загруженном транспортном узле.

Обычный светофор не способен регулировать цикл работы, благодаря системе «умный» светофор, данное время контролируется и меняется в зависимости от загруженности. Процессор «умного» светофора получает информацию о потоке машин с видеокамер и детекторов, обрабатывает ее и в соответствии с этим по установленному алгоритму принимает решение, в каком направлении необходимо увеличить продолжительность зеленого света. Таким образом, вероятность образования большой пробки, в каком-либо направлении существенно снижается.

Также данная система способна прогнозировать транспортную ситуацию и заранее сформировать эффективный план управления движением и при возникновении ДТП на перекрестках, данный план автоматически корректируется. Если произойдет сбой системы, то светофоры будут функционировать в автономном режиме и регулировка перекрестков будет осуществляться традиционным способом.

На перекрестках можно установить определенный тип датчиков, который будет учитывать приоритет общественного транспорта и экстренных служб перед остальными участниками движения, а также при использовании специальных метеостанций, которые будут собирать информацию о погодных условиях и состоянии асфальта, позволят помочь скорректировать скоростные ограничения и предупредить водителей о неблагоприятных условиях на дороге.

«Умный» перекресток

«Умный» перекресток – это система адаптивного управления светофорными объектами.

Данная система включает в себя следующие компоненты:

1) обнаружение: обнаружение транспорта осуществляется с помощью заложенных в дорожное полотно индуктивных петлевых детекторов;

2) управление: управление светофорами в адаптивном режиме с приоритетом движения городского транспорта;

3) синхронизация: интеграция всех объектов в интеллектуальную транспортную систему.

Интеллектуальное управление светофорными объектами с применением индуктивных петлевых детекторов является самым надежным и распространенным в мире. В дорожное полотно через штрабу 1 см и глубину 15 см устанавливаются индуктивные петлевые детекторы, которые позволяют детектировать как личный, так и общественный транспорт. При замене асфальта ИПД не повреждаются и обеспечивают 99,9% детектирования транспорта (рисунок) [3]. Все элементы системы подключаются в локальный адаптивный центр управления, а провода прокладываются под землей и не портят внешний вид города. Например, при детектировании трамвая у остановки включается зеленый сигнал светофора для пешеходов, чтобы осуществить безопасную посадку и высадку пассажиров. В вечернее и ночное время пешеходу для приоритетного включения пешеходной фазы нужно нажать кнопку, чтобы безопасно перейти дорогу. Благодаря этому ночью водители ав-



Установка индуктивных петлевых детекторов

томобилей экономят почти в 3 раза больше времени, так как в отсутствии пешеходов им всегда горит зеленый свет. Данная система дает положительный эффект для всех участников дорожного движения.

Такая система недавно начала активно внедряться в Москве. Например, на «умном» перекрестке Чонгарского и Симферопольского бульваров улучшились показатели:

– для пешеходов уменьшилось время ожидания пешеходной фазы днем на 24%, ночью – на 54%;

– для пассажиров городского транспорта сократилось время в пути, для трамвая на 24%, троллейбуса и автобуса на 45%;

– для водителей личного транспорта в зависимости от времени суток время проезда перекрестка сократилось на 20–45%.

Планируется до конца 2020 г. установить 465 «умных» перекрестков в Москве.

Заключение

Главная задача, определяющая развитие ИТС, – необходимость организации безопасного и комфортного дорожного движения всех его участников при помощи внедрения инновационных технологий и новых управленческих решений. Обеспечение рационального и системного оперативного взаимодействия транспортной инфраструктуры и научно-обоснованных методов управления интеллектуальными транспортными системами позволяет осуществлять управление транспортными потоками в режиме реального времени, что существенно повышает

эффективность работы транспортной сети и препятствует образованию заторов, способствуя сокращению транспортных задержек, расхода топлива, но при этом обеспечивает достаточный уровень безопасности дорожного движения. Системы «умный» светофор и «умный» перекресток позволяют сократить образование пробок, повысить безопасность и пропускную способность на загруженных участках дорог.

Библиографический список

1. *Жанказиев С. В.* Интеллектуальные транспортные системы: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2016. 120 с.
2. *Евстигнеев И. А.* Интеллектуальные транспортные системы на автомобильных дорогах федерального значения России. М.: Перо, 2015. 164 с.
3. Умный перекресток. URL: <https://spetsdor.ru/> (дата обращения: 10.12.2020).

УДК 658.562

Е. С. Лабутина*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЗАЩИТЕ ОТ КОНТРАФАКТНЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Рассмотрены ключевые стадии борьбы с поступлением и использованием контрафактной продукции на производственном предприятии в общем комплексе мероприятий, который необходимо проводить выделенным для этих целей внутренним подразделением.

Ключевые слова: комплекс мероприятий, контрафактная продукция, предприятие, безопасность, меры борьбы, выявление.

E. S. Labutina*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DEVELOPMENT OF A SET OF MEASURES TO PROTECT AGAINST COUNTERFEIT COMPONENTS AT A MANUFACTURING ENTERPRISE

The key stages of the fight against the receipt and use of counterfeit products at a manufacturing enterprise are considered in the general complex of measures that must be carried out by an internal unit allocated for these purposes.

Keywords: complex of measures, counterfeit products, enterprise, security, control measures, detection.

На предприятиях по производству строительной дорожной техники, экскаваторов, погрузчиков и другой мобильной и стационарной спецтехники важным является сохранение высокого качества производимой продукции для поддержания высокой конкурентоспособности в условиях рыночной борьбы за клиента. Одним из ключевых факторов качества является недопущение использования контрафактных комплектующих при сборке единиц продукции.

Объем оборота поддельной продукции в мире достигнет 1,82 трлн долл. в 2020 г. Такой прогноз дает Global Brand Counterfeiting Report («Глобальный отчет о подделке брендов»). Это сумма, которую могли бы заработать официальные производители, если бы не подделки [1].

Для предотвращения использования некачественной продукции необходимо разработать некий алгоритм действий, необходимых предпринять предприятию или соответствующему департаменту предприятия при получении контрафактной продукции от того или иного поставщика комплектующих. Выделенное предприятием для целей борьбы подразделение сотрудников должно не только не допустить использования контрафактной продук-

ции, но и обезопасить организацию от повторных поступлений некачественных поставок.

Некачественные комплектующие, предназначенные для различных единиц спецтехники, могут выявляться на разных этапах цикла сборки, а иногда и при эксплуатации готового продукта, что влечет за собой различные негативные последствия для предприятия-изготовителя. Это приводит к серьезным проблемам как с финансовой стороны, так и с репутационной.

Чтобы избежать этих проблемы, стоит проанализировать все возможные методы борьбы с контрафактной и фальсифицированной продукцией и предпринять меры для того, чтобы не допускать такую продукцию к эксплуатации.

Важно отметить, что ключевая роль в работе по такой борьбе должна отводиться отдельному подразделению, а именно – подразделению безопасности, поскольку оно не только координирует деятельность других служб, но и анализирует полученную информацию, использует ее при планировании последующих мероприятий. Чтобы мероприятия, производимые данным подразделением, соответствовали текущей ситуации, подразделение безопасности обязано актуализировать или дорабатывать комплекс

мер с учетом рыночной ситуации, организации деятельности в компании.

Более того, службе безопасности необходимо проводить мероприятия по модернизации комплекса мер по защите от контрафактных комплектов при изменениях на рынке и корректировать отдельные шаги с учетом нюансов выпускаемой продукции и организации новых бизнес-процессов на предприятии.

Подразделение безопасности включается в работу чаще всего при получении информации от ответственных служб на стадии приемки продукции, т. е. при наличии фактов, свидетельствующих о получении контрафактной поставки.

Стадии комплекса мероприятий по организации защиты от поступления контрафактной продукции на предприятие можно разбить на шесть стадий.

Стадия 1. Входной контроль при приемке продукции. Это стадия очень важна, поскольку именно при приемке определяется последовательность дальнейших действий. В 90% случаев во время входного контроля можно обнаружить некачественную продукцию и не допустить ее использования.

Порядок приемки товара, как правило, четко описан в договоре и связан со сложным перечнем прав и обязанностей сторон по принятию, осмотру и проверке соответствия продукции заявленному качеству.

Большинство судебных споров по договору поставки связано с вопросом приемки товара. И для поставщика, и для покупателя крайне важно, как будет согласован порядок приемки, поскольку, рассматривая иски требования покупателя, связанные с нарушением поставщиком условий договора о количестве, качестве, ассортименте, комплекте и комплектности товара или о таре и упаковке, суд обязательно будет требовать подтверждений, правильно ли был принят товар и можно ли было обнаружить его недостатки в сроки, отведенные на приемку.

Эта стадия является основной и решает следующие задачи:

- установить соответствие качества продукции заявленным требованиям для своевременного предъявления претензий поставщикам;
- предотвратить запуск в производство некачественной продукции.

Входной контроль может состоять из нескольких этапов, например:

- документального;
- визуального;
- инструментального.

Рассмотрим каждый этап подробнее.

1. Документальный контроль представляет собой проверку наличия сопроводительной документации, удостоверяющей качество и комплектность продукции: полного соответствия условных обозначений товара и его количества в документации (счет-фактура, товарная накладная и др.) с поставленной продукцией.

2. При визуальном контроле проводится внешний осмотр продукции, выявляются видимые деформации, явные трещины, повреждения поверхности. Возможно, на данном этапе потребуются эксперт профильного подразделения для оценки качества продукции.

3. Инструментальный контроль. На данном этапе проверяются качественные характеристики товара. Этот вид контроля обязательно проводится техническими специалистами, которые подтверждают или опровергают соответствие продукции заявленному качеству. Однако во время такой проверки невозможно обнаружить скрытые недостатки, которые могут быть выявлены лишь в процессе обработки, подготовки к сборке, в процессе сборки, испытания, эксплуатации. В таком случае акт о скрытых недостатках продукции должен быть составлен в течение пяти дней после обнаружения недостатков, но не позднее четырех месяцев со дня поступления товара на склад заказчика, обнаружившего скрытые недостатки, если иные сроки не установлены обязательными для сторон правилами.

Стадия 2. На данной стадии производится заключение внутреннего заказчика о несоответствии закупленной продукции официальному каталогу. Если при входном контроле, подготовке к сборке или на этапе сборки обнаруживается, что качество товара не соответствует заявленному в документации, внутренний заказчик пишет об этом в заключении, которое отправляет в подразделение безопасности. Также его следует отправить в юридический отдел, специалистам по закупкам.

Данное заключение должно отражать:

- дату обнаружения несоответствия;
- характеристику товарно-материальных ценностей (ТМЦ) и описание выявленных несоответствий, желательно со ссылками на документы, где представлены данные о надлежащем качестве продукции (ГОСТ, каталог официального производителя и т. д.);
- емкое описание причины, по которой ТМЦ невозможно использовать в производстве;
- предъявляемое требование (необходимо заменить продукцию, разобраться в ситуации или иное);
- подпись лиц, проверявших качество товара.

Получив заключение, подразделение безопасности составляет план мероприятий. Юридический департамент разрабатывает правовую защиту. Отдел закупок связывается с поставщиком и пытается решить проблему в досудебном порядке.

Для компаний-производителей, в том числе комплектующих, в общем случае существуют требования к качеству, которые определены Международной организацией по стандартизации (МОС или ИСО, англ. International Standard Organization – ISO). Требования к системам качества содержатся в стандартах ИСО серии 9000:

- 1) ИСО 9000 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь».
- 2) ИСО 9001 «Системы менеджмента качества. Требования».
- 3) ИСО 9004 «Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого развития» [2].

Те же стандарты применимы и для предприятия-производителя спецтехники, как для производителей продукции уже на следующем этапе жизненного цикла поступивших от поставщика или соответствующей компании-производителя комплектующих.

Для грамотной реализации этапа выявления несоответствий поступившей продукции на предприятии должна быть выстроена слаженная система взаимного контроля и обмена информацией между подразделениями, ответственными за закупку товара, его приемку и противодействие контрафакту. Поэтому важно, чтобы все службы были в курсе риска приобретения контрафактной продукции и мер противодействия ему.

Стадия 3. Проверка поставщика в списке официальных дистрибьюторов продукции – это следующая незаменимая стадия в комплексе мероприятий по защите от контрафактных поступлений на предприятие. Это один из методов проверки поступающих на предприятие материалов на предмет подлинности. Здесь следует воспользоваться открытыми источниками, предоставляемыми компаниями производителями, среди них:

- инструкции по проверке поступившей партии комплектующих на подлинность;
- электронные сервисы по проверке подлинности продукции.

Однако эти сведения позволяют выявлять контрафактную продукцию лишь в ряде случаев и рассчитывать только на них не целесообразно.

Заботясь о своей репутации, крупные производители зачастую размещают на своем сайте

список официальных дистрибьюторов. Следует проверять, является ли поставщик действующим авторизованным дилером, в том числе обращаясь с запросом напрямую к компании-производителю.

Если выяснилось, что поставщик не относится к авторизованным дилерам, то:

- подразделение безопасности компании должна взять его на особый контроль как потенциального поставщика контрафактной продукции;
- отдел закупок компании следует ориентировать на приобретение продукции только у официальных дистрибьюторов.

Стадия 4. За этапом проверки поставщика следует запрос в представительство официального производителя. Процесс взаимодействия с официальными производителями может начинаться уже на этапе приемки продукции. Если появляются сомнения в оригинальности закупленного товара, компания-производитель может по запросу подготовить официальное заключение о качестве продукции, которое станет объективным доказательством как в общении с профильными службами, так и с поставщиком.

Получить заключение официального производителя очень важно, поскольку в данном документе:

- структурированы все сведения о товаре;
- указаны результаты объективной экспертизы качества продукции.

Официальные документы необходимы для ведения претензионной работы с поставщиками контрафактной продукции и/или для передачи материалов в суд, а при необходимости и передавать в правоохранительные органы.

Стадия 5. На следующей стадии следует регулирование вопросов с поставщиком в досудебном порядке. Как правило, компании, которые поставляют контрафакт, не готовы заменить партию некачественной продукции на оригинальную. Однако досудебное взаимодействие с такими поставщиками необходимо, поскольку полученный от них ответ можно использовать при судебном разбирательстве. Даже если поставщик игнорирует письмо с просьбой заменить продукцию, его молчание может быть расценено судом как косвенное доказательство вины.

Стадия 6. Когда собрана вся доказательная база (документы по поставке продукции, внутреннее заключение, заключение независимой компании, письмо поставщику и, возможно, его ответ), необходимо обратиться в суд. Юристы могут просчитать, высока ли вероятность

того, что дело будет выиграно в суде. Даже если 100% уверенности в том, что дело будет выиграно, нет, в суд обращаться все равно следует, чтобы создавать прецеденты и давать подобным делам огласку.

Стоит отметить, что одним из главных условий противодействия обороту неаутентичной, в том числе контрафактной и фальсифицированной продукции является достижение прозрачности. Сведения о контрафактной продукции и о способах борьбы с ним имеются в различных открытых источниках, в том числе на сайтах компаний-производителей. Следовательно, задача подразделения безопасности предприятия – уметь пользоваться этими сведениями, анализировать опыт других компаний и работать на опережение, чтобы обезопасить свою организацию. В то же время важно делиться своим опытом и создавать прецеденты.

Перечень основных стадий комплекса мероприятий по противодействию контрафакту не будет эффективен, если на предприятии слабая система внутреннего контроля. Признаками такой системы можно считать:

- частые претензии по качеству производства;
- постоянные списания з/ч и ТМЦ для устранения выявленных дефектов;
- отсутствие взаимодействия между подразделениями при обнаружении продукции ненадлежащего качества;

– заинтересованность определенного круга сотрудников в регулярном использовании такой продукции.

Это далеко не все проблемы, которые могут затруднять работу предложенного комплекса мер. Путем проведения диагностики системы корпоративного управления можно выявить ее основные слабые места и принять меры для их скорейшего устранения. После внедрения процедуры надлежащего корпоративного управления, станет возможным создание системы, не допускающей использования в деятельности организации некачественной продукции, которая может приводить к убыткам.

Безусловно, для каждого предприятия следует адаптировать данный комплекс, учитывая все его внутренние процессы. Выстраивание системы противодействия контрафакту начинается с полного анализа поступления комплектующих на конкретное предприятие.

Библиографический список

1. Как победить контрафакт? // БИЗНЕС Online. 2020. URL: <https://www.business-gazeta.ru/article/478063> (дата обращения: 08.12.2020).
2. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200124393> (дата обращения: 08.12.2020).

УДК 656.025.4

Н. А. Ларионов*

магистрант

С. В. Уголков*

кандидат военных наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ МУЗЕЙНО-ВЫСТАВОЧНЫХ ЭКСПОЗИЦИЙ ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В РИМ

Рассматриваются вопросы организации перевозки музейно-выставочных экспозиций. Проводится детальный анализ специализированного подвижного состава и условий для перевозки экспозиций на морском, железнодорожном и автомобильном транспорте. На основе сравнительного анализа коммерческих показателей перевозки определяется наиболее оптимальный вариант перевозки.

Ключевые слова: транспорт, музейно-выставочные экспозиции, специализированный подвижной состав, контейнеровоз, контейнер, тентовый полуприцеп, провозные платежи.

N. A. Larionov*

Postgraduate Student

S. V. Ugolkov*

PhD, Military, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

FEATURES OF THE ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF MUSEUM AND EXHIBITION EXPOSITIONS FROM ST. PETERSBURG TO ROME

The article deals with the organization of transportation of Museum and exhibition expositions. A detailed analysis of specialized rolling stock and conditions for transportation of expositions on sea, rail and road transport is carried out. Based on a comparative analysis of commercial transportation indicators, the most optimal transportation option is determined.

Keywords: transport, museum and exhibition expositions, specialized rolling stock, container ship, container, tent semi-trailer, freight charges.

Введение

Организация выставок – одна из самых главных составляющих экспозиционной работы музея. Подобные мероприятия становятся все более доступными, что определенно повышает общественное и вразумительное значение музейного фонда. Выставки впрыскивают в культурный и научный кругооборот монументы собственных собраний и расширяют географию своего действия. В настоящее время международный обмен выставками довольно активно растет.

Музейная экспозиция является фундаментальной конфигурацией музейной коммуникации, образовательная и воспитательная миссия которой исполняются посредством демонстрации музейных предметов, организованных, объясненных и помещенных в соответствии с исследованной музеем академической концепцией и современными принципами архитектурно-художественного решения. Экспозиции в основном

подразделяются на две категории: временные и постоянные. К временной экспозиции относятся музейные выставки – неподвижные и передвижные. На выставке обычный музейный предмет превращается из источника познания в активно воздействующий субъект. Экспозиции каждые пять лет обновляются целостными разделами в соответствии с свежееиспеченными открытиями и находками [1]. И постоянная экспозиция – это выставка, оглавление которой не изменяется в течение длительного срока (исчисляется годами). Как правило, постоянные экспозиции предполагают собой залы и стенды в музеях, а состав экспонатов изменяется изредка.

Выбор подвижного состава на видах транспорта

На дальние расстояния музейно-выставочные экспозиции перевозят по морю, а также железнодорожным и автомобильным транспортом.



Рис. 1. 40-футовый контейнер модификации «HighCube»

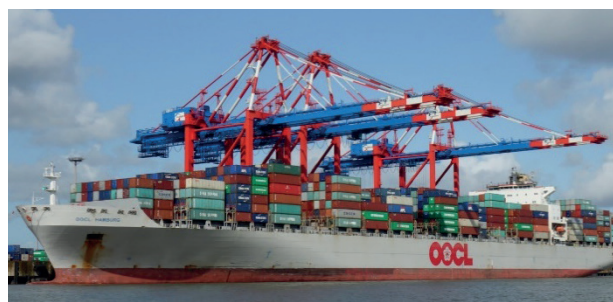


Рис. 2. Контейнеровоз OOCLHAMBURG

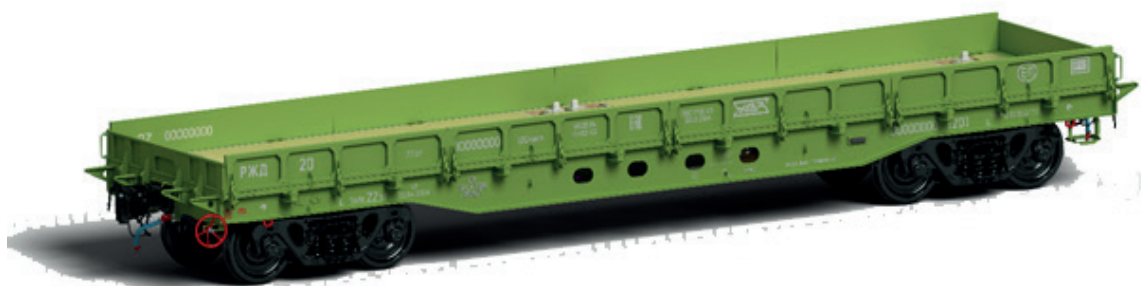


Рис. 3. Четырехосной платформы модели 13-192-02

В статье рассматривается организация перевозки музейно-выставочных экспозиций из Санкт-Петербурга в Рим прямым железнодорожным маршрутом, а также двумя маршрутами смешанной перевозки посредством трех видов транспорта (железнодорожный транспорт, морской транспорт, автомобильный транспорт).

Для минимизации материальных и временных затрат на осуществление погрузочно-выгрузочных работ в качестве укрупненной грузовой единицы будет выбран 40-футовый универсальный контейнер модификации «HighCube» (табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики 40-футового контейнера «HighCube»

Параметр	Показатель
Внешние размеры (длина, ширина, высота), м	12192/2438/2896
Внутренние размеры (длина, ширина, высота), м	12039/2350/2684
Размеры дверного проема (ширина, высота), м	2340/2597
Объем, м ³	76
Вес, кг	4000
Максимальная грузоподъемность, кг	26500

Перевозка контейнеров на морском транспорте будет осуществляться с помощью грузового судна – контейнеровоза.

С помощью автоматизированной информационной системы MarineTraffic [2] выбрано судно контейнеровоз OOCLHAMBURG, показанный на рис. 2.

Для перевозки музейно-выставочных экспозиций в контейнерах по железной дороге выбрана фитинговая платформа модели 13-192-02 [3]. Грузоподъемность 77 т и внутренние размеры 14,62×3,141 м. На данной платформе можно разместить один 40-футовый контейнер, в котором 24 транспортных пакета. Масса груза в контейнере будет составлять 2172 кг (2,172 т), а с паллетами – 2682 кг. Грузоподъемность контейнера составляет 26,5 т (рис. 3). Для транспортировки музейных экспозиций понадобится один контейнер.

Автотранспортом экспозиции перевозят в 10-тонном тягаче HINO 500 и в качестве полуприцепа тентовый полуприцеп Kogel SN 24 (рис. 4).

Упаковка и маркировка экспонатов

Маркировка музейных предметов представляет собой нанесение на предмет его полного учетного номера, состоящего из следующих обозначений:

– аббревиатура музея (принятое сокращенное наименование музея, выраженное заглавными буквами, например, ГЭ – Государственный Эрмитаж, ГИМ – Государственный Исторический музей и т. д.);



Рис. 4. Тягач Hino 500 т и тентовый полуприцеп Kogel SN 24

– шифр фонда и учетный номер по книгам поступлений (СФ – сырьевой фонд, ЭФ – экспериментальной фонд и т. д.);

– шифр фондовой коллекции и учетный номер по инвентарной книге (ДРЖ-524);

– шифр и учетный номер по специальной инвентарной книге (ЗА-78).

Таким образом, полное учетное обозначение музейного предмета имеет вид: ГИМ-ГИК-1612/М-67/ЗА-5.

При ручной и механической маркировке музейных предметов применяются следующие способы нанесения их постоянных учетных обозначений:

- на картинках без подрамников;
- на картинах большого размера – дважды;
- на акварелях, рисунках, гравюрах, плакатах, отдельных рукописных листах, не оформленных в паспорте – на обороте листа в одном из углов;
- на предметах, оформленных в паспорте;
- на предмете, не подлежащим раскантовке – на его окантовке;
- на альбомах с рисунками, гравюрами, фотографиями; образцами тканей и прочие – на обороте титульного листа;
- на крупногабаритной скульптуре, рельефах, прикрепляемых к стене, архитектурных фрагментах (колонны, карнизы и прочие) – на торцах;

– на предметах керамики стекла, дерева, металла и камня – эмалевой краской с покрытием туши прозрачным лаком;

– на миниатюрах, монетах, медалей, камнях, крестах, мелких археологических предметах и другие – на индивидуальной коробке (футляры, конверты и прочие);

– на огнестрельном оружии – на внутренней стороне спусковой скобы;

– на холодном оружии – на рукояти;

– на оборонительном вооружении (шлемы, щиты и т. д.) – на внутренней стороне;

– на негативах размером менее 9×12 см – на конверте;

– на малоформатных позитивах – на монтажке;

– на чучелах – на подставках;

– на препаратах, заключенных в банки;

– на сыпучих образцах – на упаковке.

Упаковкой произведений искусства называется их малогабаритное расположение в ящике или любой другой таре, обеспечивающее их безопасность во время транспортирования и во время вынужденного хранения в упакованном состоянии [4].

Габариты тары обязаны соответствовать и отвечать ГОСТу 11320-65 «Система размеров ящиков и потребительской тары для товаров народного потребления» [5].

В данной работе рассматривается одновременная перевозка музейно-выставочных экспозиций, габаритно-массовые характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Габаритно-массовые характеристики предметов

Экспозиция	Количество, шт.	Размеры, см	Масса, кг
Картины	40	100×80×50	5
Фарфоровые фигурки	20	120×60×40	5
Янтарные украшения	20	120×60×40	3
Бюсты	5	110×90×45	180
Средневековые ларцы и футляры из кожи	24	27×17×15	13
Медные предметы (быт, оружие, украшения)	40	115×10×5	15

Характеристика маршрутов перевозки

Для того чтобы правильно определить оптимальный маршрут и вид транспорта, который будет использоваться для перевозки музейно-выставочных экспозиций нужно произвести сравнительный анализ характеристик всех име-

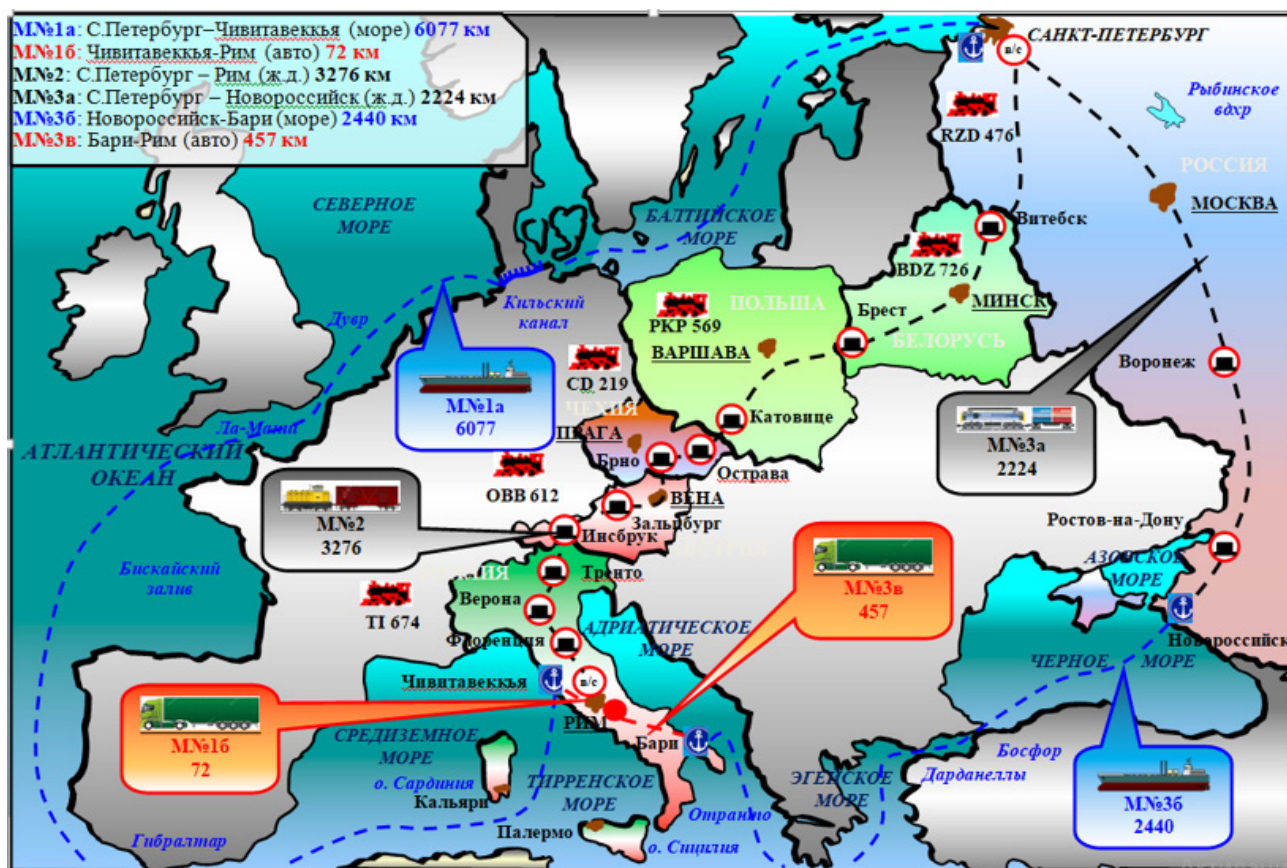


Рис. 5. Схема маршрутов перевозки

ющихся коммерческих показателей реально существующего трафика.

Определение маршрута является важнейшей частью, так как от этого зависит стоимость, скорость доставки и безопасность перевозимого груза.

Различные варианты маршрутов приведены на рис. 5.

Маршрут № 1 «порт Санкт-Петербург – порт Чивитавеккья» морским транспортом; «порт Чивитавеккья – Рим» автомобильным транспортом. Расстояние – 6149 км. Для этих целей мы будем использовать по морю контейнеровоз OOCLHAMBURG и наземным транспортом с помощью 10-тонного тягача NINO 500 с тентовым полуприцепом KogelSN 24.

Маршрут № 2 «железнодорожная станция Санкт-Петербург – железные дороги Беларуси, Польши, Чехии, Австрии, Италии – железно-дорожная станция Рим» на платформе модели 13-192-02. Расстояние – 3276 км.

Маршрут № 3: № 3а – «железнодорожная станция Санкт-Петербург – железно-дорожная станция Новороссийск»; № 3б – «порт Новорос-сийск – порт Бари морским транспортом»; № 3в – «в Бари – Рим автомобильным транспортом».

Подвижной состав будет такой же, что и на дру-гих маршрутах.

Тарифное расстояние железнодорожным транспортом из Санкт-Петербурга в Новорос-сийск – 2224 км. Определение тарифного рассто-яния морским путем из порта Новороссийск до порта Бари – 1317,35 мили, или 2439,72 км.

Определение тарифного расстояния автомо-бильным путем из Бари в Рим: «Бари – Неа-поль – Рим» (авто) равно 456,77 км.

Таможенные платежи

Расчет таможенных платежей – это один из главных этапов внешнеэкономической сделки. Длительность расчета таможенных плате-жей обусловлен некоторыми важными факто-рами: правильный подбор кодов ТН ВЭД; про-токол воздействия; учет влияния; преференций со стороны государства происхождения това-ров; своевременная информация о необходи-мости предоставления дополнительной докумен-тации, сертификатов, лицензий и прочие доку-менты. Лишь только умелый полный расклад к таможенному оформлению позволит выпол-нить поставку продукции быстро, без задержки

и с преимущественно хорошей ставкой по таможенным платежам [6].

Согласно российскому законодательству, таможенные платежи состоят из четырех составляющих:

- ввозные или вывозные таможенные пошлины;
- НДС;
- акцизы;
- таможенные сборы.

Таможенные пошлины – это преимущественно сложная доля всех таможенных платежей. Имеются всего четыре варианта таможенных пошлин:

1) адвалорная таможенная пошлина – вид таможенных пошлин, взимающихся в процентном отношении к таможенной цене облагаемых продуктов или товаров;

2) специфические пошлины – это пошлина, исчисляемая в единицах валюты в привязке к естественным (физическим) размерам (весам) импортируемых товаров (продуктов). Специфические пошлины, в одном ряду с комбинированными пошлинами, которые создают пиковые ставки таможенных тарифов и служат инструментом обороны внутреннего рынка;

3) комбинированные пошлины – это пошлина которая сочетает в себе оба вышеперечисленных видов ставок таможенных пошлин. Они рассчитываются как с таможенной ценой товаров, так и с их объема в естественном выражении, вслед за тем эти суммы сравниваются и уплачивается большая из них;

4) сезонные пошлины – это пошлины, которые используются для оперативного регулирования международной торговли продукцией сезонного характера, прежде всего сельскохозяйственной (обычно срок их действия не может превышать нескольких месяцев в год).

Тип и размер пошлины определяется в соответствии с кодом ТН ВЭД в специальном классификаторе. Размер пошлины, указанный в классификаторе, при оплате берется в размере 75, 100 или 200%. Это находится в зависимости от страны происхождения.

НДС взимается лишь только при вывозе продукции из Российской Федерации. Величина налога станет оформлять 10 или же 18% в зависимости от вида и качества сделанной продукции.

Сбор за таможенное оформление.

До подачи декларации или одновременно с подачей декларации с импортеров взимается таможенный сбор за таможенное оформление. Ставки фиксированы и зависят от таможенной стоимости товара, устанавливаются Правитель-

ством Российской Федерации. После уплаты всех платежей таможенный орган выдает плательщику подтверждение уплаты всех сборов [7].

Код ТН ВЭД

Десятизначный код присваивается всем импортным и экспортным товарам для упрощения государственного регулирования внешнего товарооборота. Код нужен для определения таможенного режима товара и размера пошлин.

Расчет таможенных платежей

Код ТН ВЭД-9706000000 (антиквариат возрастом более 100 лет) [8].

Ввозная таможенная пошлина – 0%.

НДС – 20%.

По курсу Центрального банка на 02.12.2020 г. стоимость 1 доллара США составляет 73,87 р.

Примерная стоимость одной экспозиции составляет 273\$ (20 000 р.).

В рассматриваемой перевозке таможенная стоимость груза составляет 34 125\$ (2 500 000 р.).

В итоге:

– пошлина – 0 р.;

– НДС – 503927,93 р.;

– Сборы за таможенное оформление – 7500 р.;

Итого таможенных платежей составил 511 427,93 р.

Сравнительные результаты использования маршрутов

Обобщив результаты показателей маршрутов, были получены следующие данные.

Маршрут № 1

Время доставки:

8,8 суток (море) + 0,16 суток (авто) = 8,96 суток = 9 суток.

Стоимость перевозки: 62860,8 р. (море) + 395540,96 р. (авто) = 458401,76 р.

Маршрут № 2

Время доставки: 6,6 суток.

Стоимость перевозки: 239 294,5 р.

Маршрут № 3

Время доставки:

3 суток (ж. д.) + 3,4 суток (море) + 4,2 суток (авто) = 10,6 суток.

Стоимость перевозки:

290758,01 р. (море) + 404143,59 р. (авто) + 54831,98 р. (ж.д.) = 749 733,58 р.

Определение наиболее оптимального варианта перевозки груза будет производиться по двум основным показателям.

1. Грузообороту – средней стоимости 1 тонно-километра груза на маршрутах перевозки. Дан-

Таблица 3

Сравнительная таблица результатов маршрута

Маршрут	Вид транспорта	Количество подвижного состава, вид	Расстояние 1 ездки, км	Время 1 ездки, сутки	Стоимость, р. / год	Руб./т км	Отношение стоимости перевозки к стоимости груза, %
№ 1 (море, авто)	№ 1а: «порт «Санкт-Петербург – порт Чивитавеккья»	1хКонтейнеровоз OOCL Hamburg	6149	9	458401,76	0,04	1
	№ 1б: «порт Чивитавеккья – Рим»	Тягач Nino 500 с тен-товым полуприцепом KogelSN 24					
№ 2 (ж.д.)	№ 2: «ст. СПб – ст. Рим»	1х40НС на 1 платформе модели 13-192-02	3276	6,6	239294,5	0,03	0,5
№ 3 (ж.д., море, авто)	№ 3а: «ст. СПб – ст. Новороссийск»	1х40НС на 1 платформе модели 13-192-02	5121	10,6	749733,58	0,06	2
	№ 3б: «порт Новорос-сийск – порт Бари»	1хКонтейнеровоз OOCL Hamburg					
	№ 3в: «порт Бари – Рим»	Тягач Nino 500 с тен-товым полуприцепом KogelSN 24					

ный показатель является эксплуатационной величиной транспортной работы, объединяющий два показателя: количество тонн груза и расстояние в километрах. Однако данный показатель не учитывает род перевозимого груза, поэтому он один не может носить абсолютную объективную оценку.

Общий вес всей отправки составляет: 2682 т брутто; 2175 т нетто.

Стоимость 1 музейной экспозиции равна 20 000 р. Общая стоимость отправки будет равна 43 500 000 р.

Грузооборот будет составлять на 3 маршрутах:

$$Q_1 = 458401 : (2175 \cdot 6149) = 0,04 \text{ р./т} \cdot \text{км};$$

$$Q_2 = 239294,5 : (2175 \cdot 3276) = 0,03 \text{ р./т} \cdot \text{км}.$$

$$Q_3 = 749733,58 : (2175 \cdot 5121) = 0,06 \text{ р./т} \cdot \text{км}.$$

2. Показатели отношения стоимости перевозки к стоимости груза:

$$R_1 = 458401 : 43\,500\,000 = 0,01;$$

$$R_2 = 239294,5 : 43\,500\,000 = 0,005;$$

$$R_3 = 749733,58 : 43\,500\,000 = 0,02.$$

Сравнительные результаты использования маршрутов по стоимостным и временным показателям представлены в табл. 3.

Анализ таблицы показывает, что самым дешевый способ перевозки является маршрут № 2, осуществляемый железнодорожным транспортом. Он является и более экономичным, и менее затратным для нас, так как время доставки будет 6,6 суток, а стоимость всего пути 239294,5 р. А самым дорогостоящим маршрутом будет являться № 3, который осуществляется смешанной перевозкой железнодорожным, морским и автомобильным транспортом. Этот маршрут является более затратным и более продолжительным.

В этом маршруте время доставки составит 10,6 суток и стоимость всего пути 749 733,58 р. Следовательно, 2-й маршрут будет дешевле на 510 439,08 р. и по времени доставки короче на 4 дня, а 3-й маршрут будет дороже на 51 0439,08 рублей и продолжительностью дольше на 4 дня.

Следовательно, исходя из таблицы и вывода для перевозки музейно-выставочных экспозиций, был выбран железнодорожный маршрут из Санкт-Петербурга в Рим, где был использован 40-футовый контейнер на 4-осной платформе, модель 13-192-02.

Заключение

В статье представлены сведения об упаковке, способе пакетирования музейно-выставочных экспозиций. Также обоснован подвижной

состав на автомобильном, морском и железнодорожном транспорте. Представлены подробные маршруты для всех видов транспорта.

На первом маршруте смешанная перевозка музейных экспозиций осуществлялась в 40-футовых контейнерах на морском транспорте на контейнеровозе «OOCL Hamburg» и на автомобильном транспорте тягачом NINO 500 с тентовым полуприцепом Kogel SN 24 составила 458 401,76 р., и время доставки – 9 дней.

На втором маршруте перевозка осуществлялась на железнодорожном транспорте железнодорожную станцию Санкт-Петербург – железные дороги Беларуси, Польши, Чехии, Австрии, Италии – железнодорожная станция Рим в 40-футовом контейнере на четырехосной платформе модели 13-192-02 составила 239 294,5 р., и время одной доставки – 6,6 суток.

На третьем маршруте смешанная перевозка осуществлялась в 40-футовых контейнерах: на железнодорожном транспорте использовалась четырехосная платформа модели 13-192-02, на морском транспорте на контейнеровозе «OOCL Hamburg» и на автомобильном транспорте использовался тягач NINO 500 с тентовым полуприцепом Kogel SN 24 составила 749 733,58 р., и время одной доставки – 10,6 суток.

Таким образом, с учетом полученных с помощью расчетов данных можно сделать вывод о том, что экономическая и быстрая перевозка будет осуществляться на маршруте № 2 железно-

дорожным транспортом на четырехосной платформе модели 13-192-02.

Библиографический список

1. Музейная экспозиция: теория и практика. Искусство экспозиции. Новые сценарии и концепции / отв. ред.-сост. М. Г. Майстровская. М., 1997.
2. База данных для морских перевозок. URL: <https://www.marinetraffic.com/> (дата обращения: 15.12.2020).
3. База данных для моделей вагонов. URL: <https://g-logistic.ru/modeli-vagonov-i-ikh-kharakteristiki> (дата обращения: 15.12.2020).
4. База данных по комплектованию музейных экспозиций. URL: <https://rykovodstvo.ru/instr/20175/index.html?page=4> (дата обращения: 15.12.2020).
5. Организация упаковки и транспортировки музейных экспозиций. URL: <http://art-con.ru/node/3599> (дата обращения: 15.12.2020).
6. База данных по таможенным платежам. URL: <https://unilogist.com/uslugi/tamozhennoe-oformlenie/raschettamozhennykh-platezhey/> (дата обращения: 15.12.2020).
7. Прейскурант № 13-01-01. Тарифы на перевозку грузов и другие услуги, выполняемые автомобильным транспортом. М.: Красный Пролетарий, 1990.
8. Наименование товара по ТН ВЭД. URL: <http://www.tamplat.ru/?mode=g33info&code=9706000000&action=print> (дата обращения: 15.12.2020).

УДК 681.5, 519.2, 658.5

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-130-137

Н. Н. Майоров*

кандидат технических наук, доцент

А. С. Костин*

аспирант

Н. В. Богатов*

инженер

Е. А. Вознесенский*

лаборант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ МАРШРУТИЗАЦИИ ПОЛЕТНЫХ ЗАДАНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПЕРАЦИОННЫХ СКЛАДСКИХ ЗАДАЧ

Рассматривается необходимость решения операционных складских задач с помощью внедрения в технологические процессы решений на основе беспилотных авиационных систем. Обосновывается необходимость формирования системы меток, системы маркеров и выбора наилучшего маршрута для полетных заданий, которые обеспечивает как точную идентификацию материальных объектов, так и решение задачи складского учета и мониторинга. Приводится математическая модель перемещения квадрокоптера между яруса склада, приводятся варианты маршрутизации квадрокоптеров. Рассматриваются результаты идентификации грузов, инвентаризации на основе использования квадрокоптеров, полученную на основе экспериментов в исследовательском летном поле ГУАП.

Ключевые слова: транспортный процесс, складской процесс, мониторинг товародвижения, дрон, Aruco-маркеры, полетные задания.

N. N. Maiorov*

PhD, Tech., Associate Professor

A. S. Kostin*

PhD Student

N. V. Bogatov*

Engineer

E. A. Voznesensky*

Laboratory Assistant

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

RESEARCH ROUTING OF FLIGHT TASKS BASED ON UNMANNED AVIATION SYSTEMS FOR OPERATIONAL STORAGE TASKS

The necessity of solving operational warehouse tasks based on the introduction of solutions based on unmanned aircraft systems into technological processes is considered. The necessity of forming a system of marks, a system of markers, and the choice of the best route for flight missions, which provides both an accurate identification of material objects and a solution to the problem of warehouse accounting and monitoring, is justified. A mathematical model of the movement of a quadcopter between warehouse tiers is presented, options for routing quadcopters are given. Considered are the results of cargo identification, inventory based on the use of quadcopters, obtained on the basis of experiments in the research airfield of SUAI.

Keywords: transport process, warehouse process, monitoring of goods movement, drone, Aruco-markers, flight missions.

Сегодня наблюдается потребность в разработке новых технологий для операционной деятельности в складских системах, деятельности по мониторингу и анализу динамических систем, мониторингу грузопотоков, в задачах по построению цифровых моделей участков и узлов систем.

Громадные сортировочные центры крупных логистических компаний поражают своим масштабом. Огромное количество различных посылок в коробках, пакетах заставляет задуматься о том, как возможно упорядочить и структурировать весь этот хаос. Ведь, согласно статистике, один только *Amazon* за новогодние праздни-



Рис. 1. Основные технологические процессы работы склада

ки отправляет в среднем 1 млрд посылок [1], а подведомственное Минкомсвязи России предприятие «Почта России» обрабатывает каждый месяц десятки миллионов международных почтовых отправлений с товарным вложением. В данном случае отслеживание огромного количества направлений доставки – это очень сложная задача для любой логистической компании. Конечно, технически, чтобы ни одна посылка не пропала, следят информационные системы, IT-департаменты, и все равно утеря и неразбериха на таких складах имеют место быть. Поэтому любые компании логистического сектора всегда в поиске решений, которые смогли помочь избежать потери груза. Сейчас повсеместно используются RFID-метки для отслеживания пути посылки, начиная со складов производителей и заканчивая розничными магазинами и домами клиентов. В случае с RFID-метками сотрудникам логистических центров приходится сканировать группы меток с помощью специального считывателя, а здесь не избежать человеческого фактора. Кроме того, такое считывание должно проходить с близкого расстояния, поскольку метки для записи используют мощность принимаемого радиосигнала, который считыватель передает им. Если считыватель далеко, то мощности для записи просто не хватит. Как видно из представленных решений, возможность задержки посылки по причине человеческого фактора очень высока.

Для решения данного круга задач сегодня необходимо применять решения на основе беспилотных авиационных систем и специализированных новых аппаратных комплексов. Именно беспилотные летательные аппараты, в нашем случае квадрокоптеры, являются одним из наиболее динамично развивающихся видов авиационной техники и активно используются при решении широкого спектра задач, в том числе и для складских [2–4]. Сегодня наблюда-

ется поиск решений, проведения большого количества конкурсов, выделения определенных грантов, для нахождения универсального решения по применению квадрокоптеров на складах для процесса инвентаризации и мониторинга. Необходимо отметить что сложности возникают с двух сторон. С одной стороны, каждый склад имеет свои уникальные особенности, определенные конструктивные требования, которые необходимо учитывать при интеграции квадрокоптера. С другой стороны, квадрокоптер, как техническая система, требует создания системы навигации внутри склада, выполнения мер безопасности, должен решать задачу, как в автономном режиме, так и в режиме ручного пилотирования. Необходимо оценивать направления воздушных потоков, высоту потолков, ярусность стеллажей и других активных элементов и преград. Необходимо соблюдение правил обеспечения безопасности при выполнении полетов. Помимо этого, на складе необходимо наличие персонала, которые могут работать, пилотировать, решать задачи автономного управления и поддерживать в работоспособности беспилотную авиационную систему. При этом производители квадрокоптеров часто представляют законченное решение, которое невозможно перенастроить для операционных задач и крайне трудно адаптировать дрон к системе навигации, которая необходима именно на выбранном складе. Отсюда возникает сложность разработки некоторого универсального решения. Рассмотрим основные технологические операции работы склада (рис. 1).

На рис. 1 приведена схема технологического процесса по приему товара. Видно, что операции инвентаризации, операционного учета и в последствии мониторинга размещения внутри склада очень важны. Помимо этого, необходимо решение задачи оптимизации маршрутизации как при размещении продукции на стеллажах,

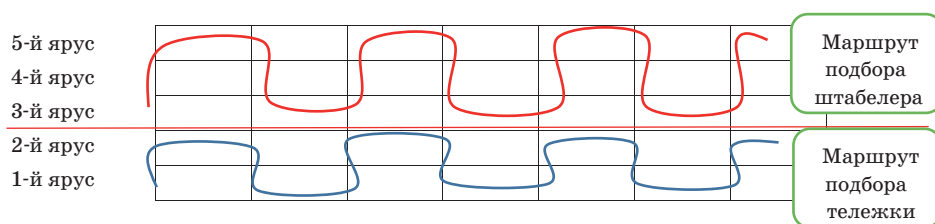


Рис. 2. Модель работы штабелера и тележки

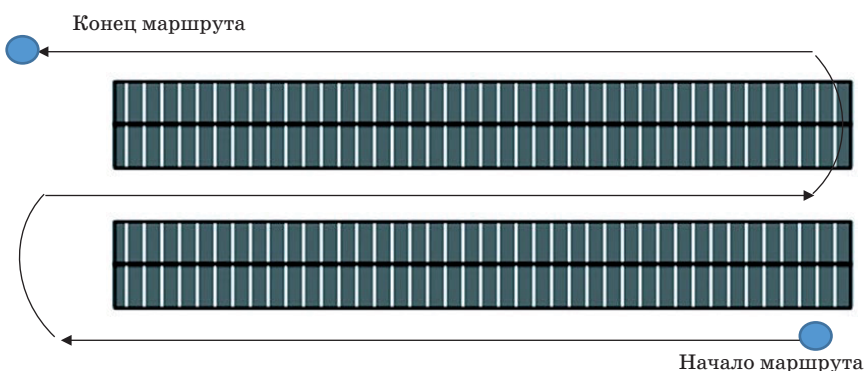


Рис. 3. Схема маршрута движения техники персонала склада при подборе товара (вид сверху)

так и при обратном процессе комплектации заказов. Модель работы штабелера и тележки показана на рис. 2.

Перемещение сотрудников склада при подборе товара показано на рис. 3.

Как видно из рис. 2; 3, перемещения определяются линейным характером перемещения вдоль стеллажей, обусловленных работой технологического складского оборудования. Данная модель требует временных задержек в точках остановки и подъема технологического оборудования на уровень необходимого стеллажа. Для ускорения процесса идентификации, мониторинга и обеспечения сложного перемещения

между уровнями и высотами стеллажей необходимо использовать беспилотные авиационные системы. Различные модели перемещения показаны на рис. 4.

Согласно рис. 4, квадрокоптер обеспечивает высокую мобильность и возможность изменения траектории под конкурентные условия и задачи на складе. Однако использование данной технологии имеет ряд необходимых к выполнению условий:

- 1) время автономного полета ограничено временем заряда аккумулятора;
- 2) в случае ручного пилотирования необходимо наличие квалифицированного персонала,



Рис. 4. Варианты перемещения вдоль стеллажей на складе:

а – стандартным технологическим оборудованием, штабелером; б – с использованием квадрокоптера

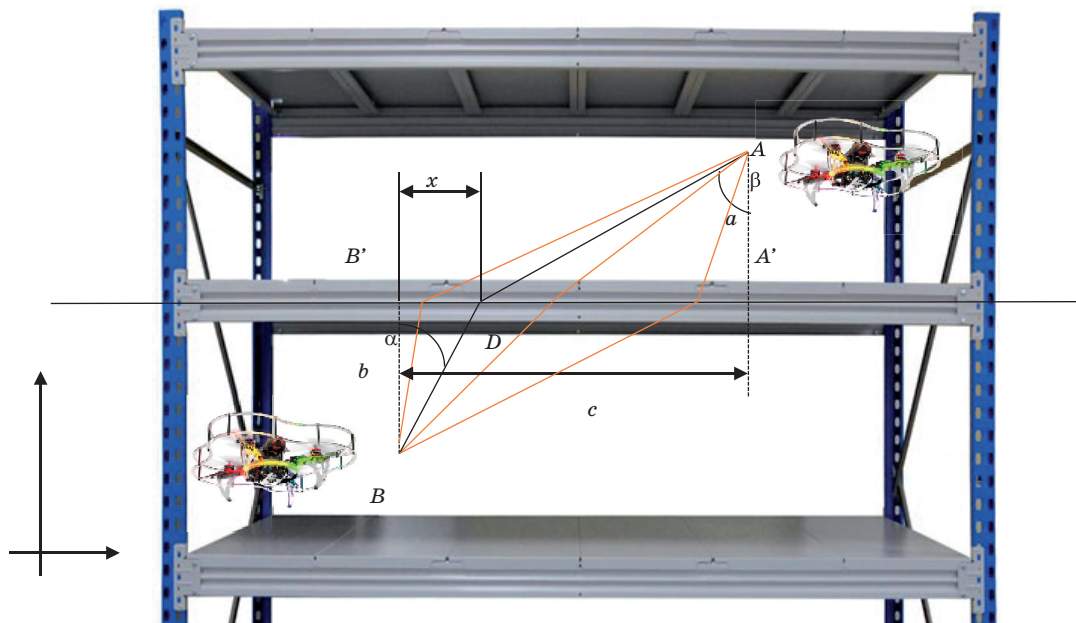


Рис. 5. Перемещение квадрокоптера вдоль стеллажа

соблюдающего все меры полетной безопасности и владеющего навыками пилотирования;

3) необходима разработки системы идентификации направлений для полетных заданий;

4) необходимо заранее формировать полетные точки и решать задач планирования маршрута, с учетом начала и конца полетной задачи.

5) необходимо принимать во внимание конструктивные особенности квадрокоптера и его аэродинамические особенности в замкнутых помещениях;

6) необходимо использовать специальные аппаратные решения и алгоритмы на основе машинного зрения для исследования и идентификации кодов грузов, формирования изображений размещения грузов на стеллажах;

7) для выполнения полетного задания необходимо ограничивать перемещение сотрудников и оборудования по проходам между стеллажами;

Квадрокоптер обеспечивает возможность выполнения сложных траекторий перемещения по заданным полетным заданиям, в отличие от линейного характера перемещения штатного складского оборудования. Поэтому одним из актуальных вопросов, является обеспечение наилучшего маршрута. Представим модель на рис. 5. Имеем участок полета, где необходимо в пространстве представить вариант самого быстрого достижения из одного положения в пространстве в другое. Для решения задачи представим геометрическую интерпретацию.

Для решения данной модели геометрическим методом (примем основными оси OXY)

примем $B'D$ через x . Тогда $D'A=c-x$, отсюда получаем длину пути квадрокоптера до и после некоторой точки D :

$$\left[\sqrt{b^2 + x^2}, \sqrt{a^2 + (c-x)^2} \right]. \quad (1)$$

Определенные затраты на перемещение квадрокоптера из B в A определяются следующим образом (S_c, S_M – некоторые целевые коэффициенты):

$$y = S_c \sqrt{b^2 + x^2} + S_M \sqrt{a^2 + (c-x)^2}. \quad (2)$$

Определим минимум полученной функции, для чего найдем первую производную и приравняем ее к нулю:

$$y'_x = \frac{S_c x}{\sqrt{b^2 + x^2}} + \frac{S_M (c-x)}{\sqrt{a^2 + (c-x)^2}} = 0. \quad (3)$$

Из чего следует следующее соотношение

$$\frac{x}{\sqrt{b^2 + x^2}} \div \frac{(c-x)}{\sqrt{a^2 + (c-x)^2}} = S_c \div S_M,$$

или в нашем случае при переходе к углам –

$$\frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} = \frac{S_M}{S_c}. \quad (4)$$

Таким образом, точку D следует оптимальным случаем формировать так, чтобы выполнялось равенство (4). На основании данной достаточно формализованной модели и при условии отсутствия внешних воздействий, можно опре-

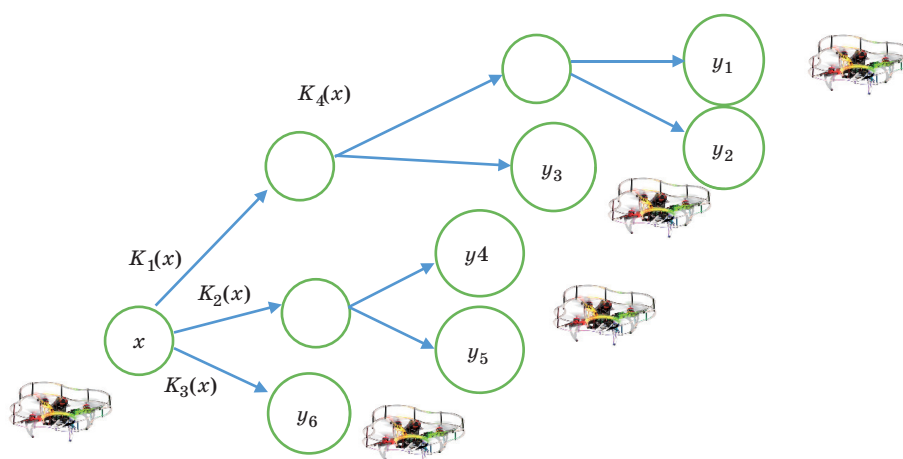


Рис. 6. Формирование условий выполнения полетов на основе теории графов

делить самый оперативный вариант перемещения вдоль стеллажей на складе.

При описании сложного перемещения квадрокоптера необходимо использовать теорию графов [5–7]. Предположим, что имеет место единое поле вершин (y_i), которые соответствуют грузам на стеллажах, между которыми будет сформировано движение. Для идентификации создается несколько полетных заданий ($K_i(x)$), которые могут выполняться либо последовательно, либо оператор склада формирует определенную задачу выборки маршрута. Модель полетного задания в форме графа показана на рис. 6.

Модель, показанная на рис. 6, относится к случаю пилотирования оператором, когда необходимо найти определенный груз на стеллажах или группу расположенных на разных уровнях. При выполнении инвентаризации выполняются следующие правила:

- 1) происходит назначение инвентаризационной комиссии;
- 2) производится приостановка отгрузки и приемки товаров;
- 3) выполняется подготовка инвентаризационных ведомостей с данным о товарах (наименование, артикул, количество, адрес хранения);
- 4) производится сверка действительного наличия товара и наличия по ведомости;
- 5) при выявлении несоответствия или брака – выставление паллеты для пересчета товара;
- 6) частичную инвентаризацию можно проводить при выявлении несоответствия учетных данных, без остановки складских процессов.

Ручная инвентаризация склада – это долгий и утомительный процесс, требующий остановки склада. Также немалую роль играет человеческий фактор – малейшая невнимательность и результаты оказываются под сомнени-

ем. Предлагается использование квадрокоптера с аппаратными средствами для выполнения мониторинга, который позволит уменьшить вероятность брака по вине человеческого фактора. Маршрутизация (выполненные полетные задания) в данном случае показана на рис. 7.

На рис. 7, а–в показаны различные варианты выполняемых полетов для задач инвентаризации. При изменении направления, коптер производит кратковременную остановку, зависание для смены направления движения. На любом этапе при выполнении как автономного управления или ручного управления можно изменить траекторию.

Практическое исследование. Задание инвентаризации

Участок склада был построен в исследовательском летном поле лаборатории беспилотных авиационных систем инженерной школы ГУАП. Данная лаборатория была открыта в ГУАП в сентябре 2020 г. Квадрокоптерами, на которых проводилось исследование, являются квадрокоптеры «Клевер» компании ООО «Коптер экспресс» модификации COEX Клевер 4 Code. Особенностью квадрокоптеров Клевер (рис. 8) является то, что он представляет собой учебный конструктор программируемого квадрокоптера, который можно применять для решения различных задач: перенос груза, FPV-пилотирование, автономное пилотирование.

Идентификация перемещения квадрокоптера выполнена на основе идентификации в полетном поле по Aruco-маркерам [8–10]. Сегодня Aruco-маркеры – популярная технология для позиционирования робототехнических систем с использованием компьютерного зрения. Эта технология пред-

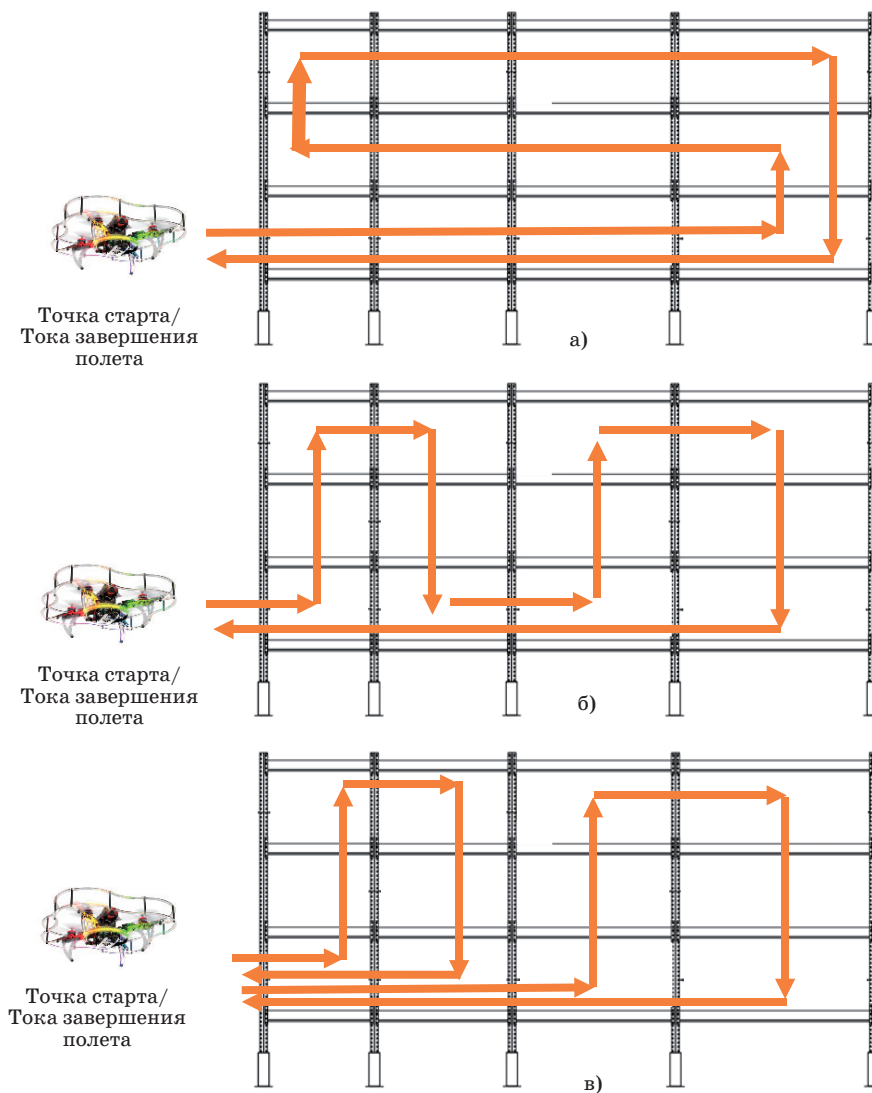


Рис. 7. Выполнение маршрута квадрокоптера при выполнении инвентаризации:
а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3



Рис. 8. Квадрокоптер Клевер 4

ставляет собой квадратный маркер, состоящий из широкой черной границы и внутренней двоичной матрицы, в которой зашифрован идентификатор (*id*) [11–13]. Черная граница маркера ускоряет обнаружение при помощи машинного зрения, а двоичная кодификация позволяет идентифицировать маркер. Размер маркера определяется раз-

мером внутренней матрицы. Также основное преимущество этих маркеров состоит в том, что один маркер обеспечивает достаточное количество информации (четыре угла распознаваемой матрицы, угол наклона и поворота матрицы) для получения позиции камеры квадрокоптера в пространстве. Агусо-маркеры имеют различные варианты размещения в помещении. Благодаря универсальности их можно располагать на полу, стенах, потолке, тем самым обеспечивать целевые установки и мобильность выполнения задач.

В исследовательском летном поле были размещены три стеллажа и 16 коробок, расположенных в случайном порядке. Практическая реализация приведена на рис. 9.

В исследовательском летном поле были реализованы полетные задания. Для решения задачи был написан программированный код для

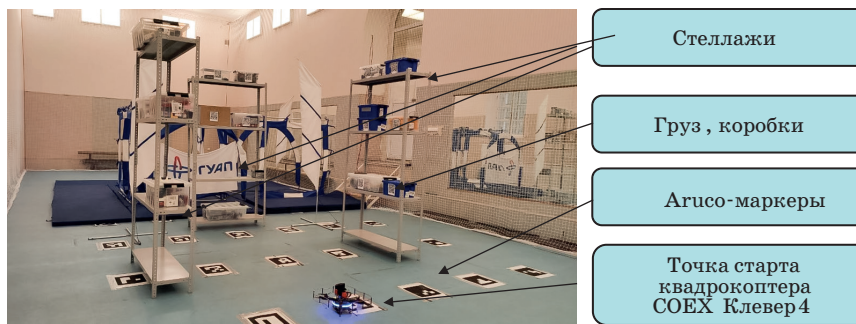


Рис. 9. Построение участка склада в исследовательском летном поле, размещение Агусо-маркеров, стеллажей и грузов



Рис. 10. Выполнение автономного полетного задания по инвентаризации на складе в исследовательском летном поле

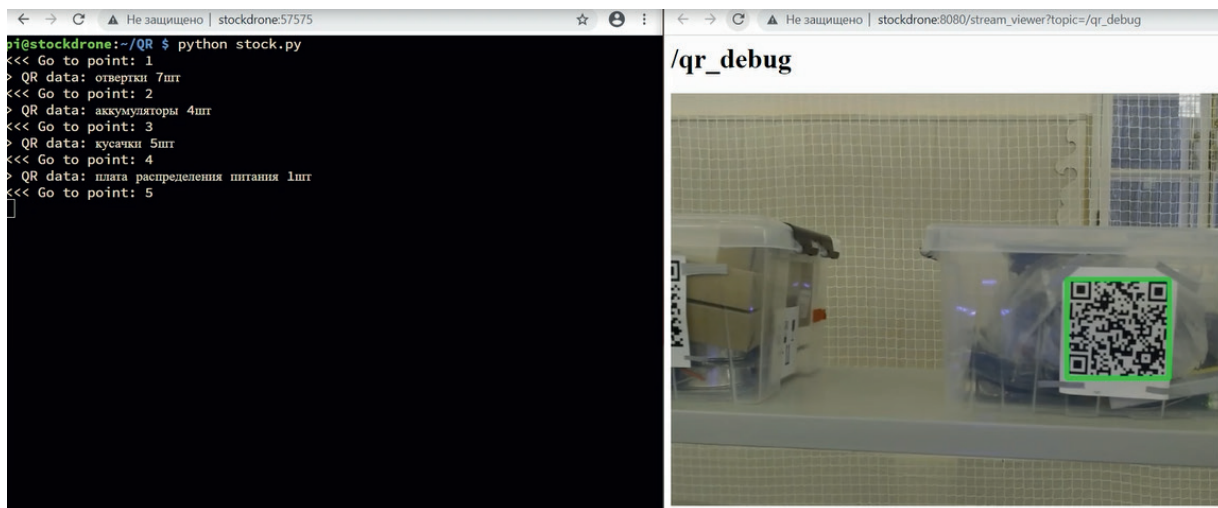


Рис. 11. Результаты идентификации и учета складских запасов с помощью квадрокоптера

автономного полета коптера и идентификации грузов при помощи машинного зрения [14] и дополнительной камеры, установленной на квадрокоптере. В ходе экспериментов производилась смена расположения грузов на полках стел-

лажей и выполнялись различные варианты полетов. Полет квадрокоптера COEX Клевер 4 Code представлен на рис. 10.

Результаты идентификации и процесса обнаружения объектов показаны на рис. 11.

Данное исследование проводится в ГУАП на базе лаборатории беспилотных авиационных систем Инженерной школы ГУАП при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № FSRF-2020-0004 «Научные основы построения архитектур и систем связи бортовых информационно-вычислительных комплексов нового поколения для авиационных, космических систем и беспилотных транспортных средств»).

Заключение

Задача инвентаризации, учета нахождения оборудования крайне актуальна для складской сферы. Ввиду изменений в цепях поставок и увеличения интернет продаж, в том числе и по причине COVID-19, руководители складов стремятся внедрять новые технологии, которые позволяли бы более оперативно и качественно решать данные задачи. В статье представлены основные технологические процессы на складе и обосновано внедрение решений

на основе использования беспилотных авиационных систем. Доказана эффективность и большая гибкость беспилотных авиационных систем по сравнению с классическим складским оборудованием. Представлено решение задачи о поиске кратчайшего маршрута между двумя полетными точками, между двумя уровнями стеллажа на складе. На основании проведенного исследования были предложены варианты организации маршрутов полетных заданий для задач инвентаризации и представлено формирование условий выполнения полетов на основе теории графов. Эксперименты проводились в исследовательском летном поле лаборатории беспилотных авиационных систем ГУАП с помощью квадрокоптера COEX Клевер 4 Code. Для решения задачи были составлены программные коды автономного полета и проводилась серия экспериментов при различном расположении как стеллажей, так грузов на них. Результаты эксперимента показали высокую практическую эффективность и доказали правильность представленных моделей и методов.

Библиографический список

1. Костин А. С., Богатов Н. В. Вопросы современного развития рынка беспилотных летательных аппаратов // Системный анализ и логистика. 2019. № 4 (22). С. 65–72.
2. Костин А. С., Майоров Н. Н. Анализ пассажиропотока остановок городского транспорта на основе использования беспилотных авиационных систем // Организация и безопасность дорожного движения: Материалы XIII Нац. науч.-практ. конф. с международ. участием (Тюмень, 19 марта 2020 г.). Тюмень: ТИУ, 2020. С. 367–371.
3. Лукинский В. С., Лукинский В. В., Плетнева Н. Г. Логистика и управление цепями поставок: учеб. и практикум для академ. бакалавриата / Высш. шк. экономики. Нац. исслед. ун-т. М.: Юрайт, 2016. 359 с.
4. Логистика промышленного предприятия: учеб. пособие / П. П. Крылатков, Е. Ю. Кузнецова, Г. Г. Кожушко, Т. А. Минеева. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 176 с.
5. Прокушев Л. А. Дискретная математика. СПб.: ГУАП, 2000. 80 с.
6. Фетисов В. А., Майоров Н. Н. Системный анализ. СПб.: ГУАП, 2016. 137 с.
7. Майоров Н. Н., Фетисов В. А. Практические задачи моделирования транспортных систем. СПб.: ГУАП, 2012. 185 с.
8. ООО «Коптер экспресс». COEX. URL: <https://ru.coex.tech/> (дата обращения: 01.11.2020).
9. Генератор Aruco-маркеров // ArUco markers generator. URL: <https://chev.me/arucogen/> (дата обращения: 01.09.2020).
10. Kim J., Kang M.-S., Park S. Accurate Modeling and Robust Hovering Control for a Quad-rotor VTOL Aircraft // Journ. Intell. Robotics Syst. 2010. Vol. 57, № 1–4. P. 9–26.
11. Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Мальцев А. С. и др. Управление параметрами полета квадрокоптера при движении по заданной траектории // Автометрия. 2012. № 5. С. 32–41.
12. Engel J., Sturm J., Cremers D. Accurate Figure Flying with a Quadrocopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012. P. 43–48.
13. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment / G. M. Hoffmann, Huang Naomiao, S. L. Wasland, E. C. J. Tomlin // Proc. of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Hilton Head, South Carolina, 2007.
14. Ким Н. В. Обработка и анализ изображений в задачах технического зрения. М.: Изд-во МАИ, 2001. 165 с.

УДК 656.025.4

М. О. Пряничникова*

магистрант

С. В. Уголков*

кандидат военных наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОРГАНИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЗМЕЙ ИЗ ПЕРУ В ВОРОНЕЖ

Рассматриваются вопросы организации наиболее экономически выгодного способа транспортировки змей из Перу в Воронеж. Выбраны маршруты перевозки груза на морском, речном, автомобильном и железнодорожном транспорте, изучены документация и технология данной транспортировки, проведен расчет провозной платы и времени в пути для каждого варианта перевозки. В ходе анализа полученных данных выбран оптимальный маршрут перевозки.

Ключевые слова: змеи, виды транспорта, организация транспортировки, документация, контейнер, таможенные границы, расчет стоимости перевозки.

M. O. Pryanichnikova*

Postgraduate Student

S. V. Ugolkov*

PhD, Military, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF SNAKES FROM PERU TO VORONEZH

The article deals with the organization of the most cost-effective method of transporting snakes from Peru to Voronezh. In the article, the routes of cargo transportation by sea, river, road and rail transport are selected, the documentation and technology of this transportation are studied, the calculation of the freight fee and travel time for each transportation option is carried out. During the analysis of the obtained data, the optimal transportation route was selected.

Keywords: Snakes, types of transport, organization of transportation, documentation, container, customs borders, calculation of the cost of transportation.

Введение

Перевозка животных требует повышенного внимания, соблюдения большого ряда правил и норм. Это касается документации, выбора оптимального вида транспорта и маршрута, создания благоприятных условий для животного, а также подготовки животного к перевозке.

В статье:

- разработаны маршруты на разных видах транспорта,
- произведен выбор подвижного состава,
- определены способы и технологии перевозки змей, рассмотрены меры безопасности,
- определены стоимостные и временные характеристики маршрутов,
- на основе анализа полученных результатов осуществлен выбор наиболее экономически выгодного способа транспортировки,
- рассмотрен порядок рассмотрения претензий и исков при перевозке животных.

Тара для перевозки змей

Перевозка змей осуществляется по правилам повышенной безопасности в закрытых емкостях с указанием маркировки о видах и количестве питомцев. Лучшим вариантом для временной упаковки послужат коробки строения типа «пенал» и максимально плотные мешки. Любая тара должна обладать крепкими замками и позволять змеям получать кислород посредством мелкой сетки. Для удобной переноски лучше выбирать контейнеры с прочными ручками.

На дно коробки для лучшей теплоизоляции стоит выложить поролон, опилки либо нарезанную тонкой стружкой бумагу. При перевозке зимой используют дополнительное тепло и выбирают виды транспорта, позволяющие сократить время пребывания в пути во избежание переохлаждения рептилий.

Часто змей перевозят в плотных мешках или контейнерах на одну особь. В данной статье рассматривается перевозка змей двух видов – бо-

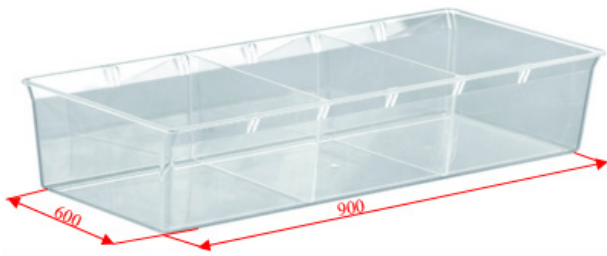


Рис. 1. Контейнер для перевозки змей

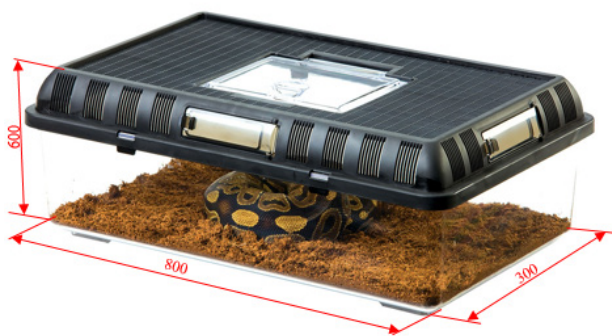


Рис. 2. Контейнер для перевозки змей

тропсов и анаконд в количестве 20 штук. Для размещения трех змей потребуется контейнер размерами 900×600×300 мм для ботропсов и контейнер для одной змеи – анаконды (рис. 1) [1].

Контейнер будет использоваться плотный пластиковый с отверстиями для доступа воздуха и плотно закрепленной крышкой. Змеи будут помещаться по одной в каждый отсек, заранее помещенной в льняной мешок. Перед размещением рептилий, контейнер дезинфицируется. Общее количество перевозимых змей рода ботропс – 18 шт. Для перевозки потребуется 6 контейнеров данного типа. Средний вес помещаемой змеи в контейнер – 6 кг.

Анаконды будут перевозиться каждая в отдельном контейнере, так как имеет большой вес – 10 кг. Общее количество анаконд – 2 шт. Размер контейнера – 800×300×300 мм (рис. 2) [1].

На контейнер с перевозимыми рептилиями обязательно должен быть наклеен ярлык зеленого цвета «живые животные» в нижней части контейнера и ярлык «Вверх» на трех сторонах.

Транспортные средства для перевозки

В ходе сравнения характеристик транспорта для перевозки змей были выбраны сухогрузные

морские суда на примере судна RSD59. Змей перевозят на морском транспорте в специальных контейнерах, в каютах на сухогрузном судне [2].

На железнодорожном транспорте рассматривается перевозка на специализированных вагонах-скотовозах или купейных вагонах [3].

На автомобильном в основном используют для перевозки специализированное транспортное средство – в рефрижераторном автомобиле ВИС 2346 на базе Нивы или ВИС 2349 Лада Гранта, который оснащен необходимым оборудованием для поддержания температуры, комфортной для змей.

Для перевозки необходимы соответствующие документы, применяемые на различных видах транспорта: коносамент, штурманская расписка, погрузочный ордер, (применяется на морском транспорте), накладная СМГС (на железнодорожном транспорте), накладная СМР, путевой лист, товарно-транспортная накладная (на автомобильном транспорте), авианакладная (на воздушном транспорте), сертификат СИТЕС, фитосанитарный сертификат, грузовой манифест [4–6].

Маршруты перевозки

Определение маршрутов является важнейшим этапом, так как от этого зависит скорость доставки, стоимость и безопасность перевозки груза. Различные варианты маршрутов показаны на рис. 3.

Маршрут № 1: Лима – Москва авиаперевозкой; далее Москва – Воронеж автомобильным транспортом. Тарифное расстояние:

$$12628+562= 13190 \text{ км.}$$

Маршрут № 2: порт Лима – порт Санкт-Петербург морским транспортом; далее Санкт-Петербург – Воронеж железнодорожным транспортом. Тарифное расстояние:

$$13307+1253= 14560 \text{ км.}$$

Маршрут № 3: порт Лима – порт Новороссийск морским транспортом; далее Новороссийск – Воронеж железнодорожным транспортом. Тарифное расстояние

$$14831+1017 = 15848 \text{ км.}$$

Определение таможенных платежей

При ввозе импортного товара на территорию Российской Федерации необходимо предоставить декларацию, после чего товар переходит в режим таможенного ввоза, после чего вы-



Рис. 3. Схема маршрутов перевозки

считывается таможенный расчет и производится оплата. Таможенные платежи производятся в соответствии со ст. 14 Таможенного кодекса Российской Федерации [7], согласно которому, все транспортные средства и товары, проходящие таможенную границу, обязаны проходить таможенное оформление и таможенный контроль. По прибытию, в течении пятнадцати дней необходимо предоставить таможенную декларацию в местные таможенные органы.

Кроме таможенной декларации, таможенным органам предъявляются документы, подтверждающие сведения, указанные в декларации:

- перевозочные документы;
- внешнеторговые договоры купли-продажи;
- разрешения, лицензии, сертификаты и другие документы, установленные для представления таможенным законодательством Российской Федерации;
- документы, удостоверяющие сведения о декларанте;
- платежные и другие расчетные документы.

Согласно ст. 130 Таможенного кодекса РФ, на импортные товары до времени их прибытия на таможенную территорию Российской Федерации может быть подана предварительная та-

моженная декларация [7]. Для этого подаются копии перевозочных документов, сопровождающих товар, заверенные декларантом.

При ввозе товаров на таможенную территорию Российской Федерации необходимо оплатить все таможенные платежи, к которым, в соответствии с п. 1 ст. 318 Таможенного кодекса РФ, относятся таможенная пошлина, НДС, акциз (для подакцизных товаров), таможенные сборы [7].

Для определения таможенной стоимости декларантом заполняются специальные формы. При применении первого метода заполняется форма ДТС-1, для остальных применяется форма ДТС-2. Таможенная стоимость, рассчитанная в ДТС, переносится в грузовую таможенную декларацию, которая в дальнейшем передается таможенным органам.

Согласно ст. 326 Таможенного кодекса РФ [7], в случае, если для определения таможенной стоимости по импортному контракту требуется перерасчет иностранной валюты, применяется ее курс по отношению к рублю, устанавливаемый Банком России и действующий на день принятия таможенной декларации таможенным органом. Ввозная таможенная пошлина – пошлина, взимаемая при импорте товара и транс-

Сравнительные результаты использования маршрутов

Маршрут	Вид транспорта	Количество подвижного состава, год	Расстояние 1 ездки, км	Время 1 ездки, сутки	Стоимость, руб.
№ 1	№ 1а: Лима – Москва (авиа)	Airbus A340-600	12 628	1,29	1 079 753
	№ 1б: Москва – Воронеж (авто)	ВИС 2346 на базе Нивы или ВИС 2349 Лада Гранта.	562		
№ 2	№ 2а: Лима – Санкт-Петербург (море)	сухогрузное судно RSD59	13 307	19,4	868 707
	№ 2б: Санкт-Петербург – Воронеж (ж/д)	Вагон модели 11-246	1253		
№ 3	№ 3а: Лима – Новороссийск (море)	Сухогрузное судно RSD59	14 831	20,8	855 421
	№ 3б: Новороссийск – Воронеж (ж/д)	Вагон модели 11-246	1017		

портных средств. Базой для исчисления ввозной таможенной пошлины является таможенная стоимость. Ввозная пошлина представляет собой процент от таможенной стоимости товара.

Сбор за таможенное оформление.

До подачи декларации или одновременно с подачей декларации с импортеров взимается таможенный сбор за таможенное оформление. Ставки фиксированы и зависят от таможенной стоимости товара, устанавливаются Правительством Российской Федерации. После уплаты всех платежей таможенный орган выдает плательщику подтверждение уплаты всех сборов.

Код ТН ВЭД.

Десятизначный код присваивается всем импортным и экспортным товарам для упрощения государственного регулирования внешнего товарооборота. Код нужен для определения таможенного режима товара и размера пошлин.

Код ТН ВЭД-0106200090 (ПРОЧИЕ РЕПТИЛИИ (ВКЛЮЧАЯ ЗМЕЙ И ЧЕРЕПАХА)) [6, 8]. Ввозная таможенная пошлина – 5%; НДС – 20 %.

Согласно данным ЦБ РФ, стоимость 1 доллара на 09.12.2020 г. к рублю составляет 73,4 р.

Примерная стоимость 1 ботропса составляет 55\$ (4037,00 р.), анаконды – 80 \$ (5872,00 р.).

В рассматриваемой перевозке таможенная стоимость груза составляет 1150\$ (84 410,00 р.).

1. Импортная пошлина – 4193,28 р.

2. НДС = $(84410,00 + 4193,28) \cdot 0,2 = 17\,611,79$ р.

3. Таможенные сборы – 500 р.

Итого: 22 305,97 р.

Сравнения показателей использования маршрутов

Для каждого вида транспорта была рассчитана стоимость перевозки. Обобщив расчеты пока-

зателей маршрутов, получены следующие данные.

Маршрут № 1. Протяженность маршрута:

12628 км (авиа) + 526 км (авто) = 13190 км.

Время доставки:

0,79 суток (авиа) + 0,5 суток (авто) = 1,29 суток.

Стоимость перевозки:

1042298 р. (авиа) + 37455,5 р. (авто) = 1079753 р. [9].

Маршрут № 2. Протяженность маршрута:

13 307 км (море) + 1253 км (ж/д) = 145 60 км.

Время доставки:

16,9 суток (море) + 2,5 суток (ж/д) = 19,4 суток.

Стоимость перевозки:

744748 р. (море) + 123959 р. (ж/д) = 868707 р. [10].

Маршрут № 3. Протяженность маршрута:

14831 км (море) + 1017 км (ж/д) = 15848 км.

Время доставки:

18,7 суток (море) + 2,1 суток (ж/д) = 20,8 суток.

Стоимость перевозки:

749858 р. (море) + 105563 р. (ж/д) = 855421 р. [10].

Показатели реализации маршрутов приведены в таблице.

Порядок страхования, рассмотрения претензий и исков при перевозке живности

При транспортировке живой груз обязательно страхуется. Страховым случаем является совершившееся событие, предусмотренное договором страхования или законом, с наступлением которого возникает обязанность Страховщика произвести выплату страхового возмещения Страхователю (Выгодоприобретателю).

Срок подачи иска, согласно закону РФ о подтверждении факта соблюдения досудебного порядка:

– морская перевозка – 1 год (ст. 402-412 КТМ РФ) [11];

– ж/д-перевозка – 6 месяцев (ст. 123 Устава железнодорожного транспорта РФ) [12];

– автодорожная перевозка (внутренняя) – 12 месяцев (ст. 39 Устава автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта);

– авиaperевозка (внутренняя) – 6 месяцев (ст. 126 Воздушного кодекса РФ);

– авиaperевозка (международная) – 18 месяцев в случае утраты багажа, груза, почты; 7 дней в случае повреждения (порчи багажа); 14 дней в случае повреждения (порчи) груза (ст. 127 Воздушного кодекса РФ) [9].

В случае наступления страхового события необходимо предоставить следующий комплект документов:

Для того, чтобы доказать наступление страхового случая необходимо: договоры (полисы) страхования, контракты, договоры купли-продажи, накладные, инвойсы, коносаменты, а также иные документы, дающие Страхователю (Выгодоприобретателю) право на распоряжение грузом; при страховании фрахта такими документами являются чартер-партии и коносаменты.

Для доказательства наличия страхового случая:

1) при морских перевозках: морской протест, акт регистра, выписка из судового журнала, диспаша (при общей аварии), ведомость о разгрузке судна, судовой манифест, сюрвейерский акт, генеральный акт или акт-извещение и т. п.;

2) при авиaperевозках: коммерческий акт авиакомпании, перевозившей груз, авианакладная с отметками о происшествии и т. п.;

3) при автомобильных перевозках: протокол ГИБДД (об административном правонарушении и т. п.); справка о ДТП; акт независимого эксперта о наличии, характере, количестве и размере ущерба в пункте назначения; транспортная накладная (ТН, CMR) с отметками о происшествии; объяснительная записка водителя о произошедшем событии и т. п.;

4) при железнодорожных перевозках: коммерческий акт, выданный железной дорогой, железнодорожная накладная с отметками об убытке, заявление об убытке начальнику станции назначения и т. п.;

5) при противоправных действиях третьих лиц (независимо от вида транспорта): Сведения об обращениях в компетентные органы и документы о наличии уголовного дела/дела об административном правонарушении (в том числе постановления о возбуждении/отказе в возбуждении уголовного дела; протокол и (или) постанов-

ление по делу об административном правонарушении и т. д.) и его результатах (если таковые имеются, в том числе постановление о прекращении производства по делу, постановление о приостановлении производства по делу, приговор суда и т. д.) или аналогичных документов, оформление которых предусмотрено законодательством соответствующего государства, на территории которого произошло страховое событие.

Для доказательства размера причиненного ущерба: акты осмотра груза независимым экспертом, акты экспертизы, оценки и т. п. документы, составленные согласно законам и обычаям того места, где определяется убыток (Если экспертиза осуществлялась независимым экспертом/оценщиком РФ, необходимо подтвердить его полномочия в отношении проведения экспертизы, а именно: представить заверенные копии лицензий/сертификатов на право осуществления оценочной деятельности в РФ; документы, подтверждающие заявляемые расходы (счета, квитанции, платежные поручения и т. п.); документально обоснованный расчет ущерба или диспаша, а также иные документы, подтверждающие размер причиненного ущерба.

Заключение

В данной статье были определены наиболее экономически выгодный и быстрый способ доставки выставочных змей из Перу в Воронеж. С этой целью был выполнен анализ трех различных маршрутов и произведены расчеты стоимости перевозки на этих маршрутах и сроки доставки.

На первом маршруте использовался воздушный транспорт Airbus A340-600 из аэропорта Лима до Москвы и автомобильный ВИС 2346 на базе Нивы или ВИС 2349 Лада Гранта из Москвы в Воронеж. Общая стоимость перевозки составила 1 079 753, что значительно превышала стоимость соотношения стоимости перевозки к стоимости груза. Время данной перевозки составило 1,29 суток.

На втором маршруте смешанной перевозки от порта Лима до порта Санкт-Петербург использовалось сухогрузное судно RSD59. Далее груз доставлялся железнодорожным транспортом в вагоне-скотовозе модели 11-246. Время груза в пути составило 19,4 суток, а общая стоимость перевозки – 868 707 р.

На третьем маршруте перевозка осуществлялась так же морским транспортом до порта Новороссийск, а из порта – железнодорожным транспортом до Воронежа. Стоимость перевозки – 855 421 р., и время доставки – 20,8 суток.

Таким образом, анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что самая быстрая перевозка является самой дорогостоящей, а самая экономически выгодная – длительная перевозка. Поскольку змеи достаточно легко переносят длительные перевозки при правильном транспортировании и уходе, то выбор последнего варианта маршрута представляется наиболее экономически обоснованным.

Библиографический список

1. Конвенция о международной торговле видами дикой фауны и флоры, находящимися под угрозой исчезновения. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/cites.shtml (дата обращения: 14.12.2020).
2. Маршрут морских перевозок. URL: https://www.searates.com/freight/?from=ChIJxz7uGfbFBZERsSi5FzLlsIBQ&to=ChIJ7WVKx4w3lkYR_46Eqz9nx20&date=24+Jan%2C+2020&type=fcl&cont%5B20st%5D=1 (дата обращения: 12.12.2020).
3. Маршруты железнодорожных перевозок. URL: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&refererLayerId=5103&id=2171 (дата обращения: 16.12.2020).
4. СИТЕС. URL: https://piterhunt.ru/library/articles/dokumenty/sites_cites_konventsiya_o_mezhdunarodnoi_torgovle_vidami_fauny_i_flor.htm (дата обращения: 14.12.2020).
5. Закон РФ от 14 мая 1993 г. № 4979-1 «О ветеринарии» и действующими нормативно-правовыми актами в области ветеринарии. URL: https://www.dairynews.ru/news/veterinarno-sanitarnyj_kontrol_perevozki_zhivotnyh.html (дата обращения: 15.12.2020).
6. Кодекс наземных животных. URL: <https://studfile.net/preview/5063460/> (дата обращения: 15.12.2020).
7. Таможенный кодекс Российской Федерации от 28 мая 2003 г. № 61-ФЗ (ТК РФ). URL: <https://base.garant.ru/5758424/> (дата обращения: 17.12.2020).
8. Единые ветеринарные (ветеринарно-санитарные) требования, предъявляемые к товарам, подлежащим ветеринарному контролю (надзору). URL: http://www.fsvps.ru/fsvps-docs/ru/laws/tsouz/tsouz_vettreb.pdf (дата обращения: 16.12.2020).
9. Требования к контейнерам (боксам) регламентируются Международной ассоциацией воздушных перевозчиков (IATA). URL: <http://bernik.ru/forum/thread119.html> (дата обращения: 17.12.2020).
10. Общие правила морской перевозки. URL: <https://www.yestravel.ru/info/sea/rules/> (дата обращения: 18.12.2020).
11. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами (Тарифное руководство № 1) / с изм. на 31 янв. 2017 г). Ч. 1; 2. М.: Красный пролетарий, 2003.
12. Приказ Министерства транспорта РФ от 19 декабря 2013 г. № 473 «Об утверждении Правил перевозок пассажиров, багажа, грузобагажа железнодорожным транспортом». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_166504/ (дата обращения: 19.12.2020).

УДК 656.073.235 : 656.073.28

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-144-149

А. Ж. Радочинская*

аспирант

А. А. Янченко*

кандидат технических наук

Т. Е. Маликова*

доктор технических наук, доцент

* Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ИМПОРТНОГО ГРУЗОПОТОКА НА КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ В СРЕДЕ MATLAB

Рассмотрены вопросы, связанные с применением математического моделирования в процессе принятия управленческих решений на морском контейнерном терминале. Представлен краткий обзор общепризнанных подходов к выбору математического аппарата для описания подзадач технологического процесса терминальной обработки груза. Подробно описаны этапы разработки математической модели на основе авторской методики анализа технологических процессов обработки импортного грузопотока на функционирующем контейнерном терминале. В качестве примера рассмотрен процесс построения дискретно-событийной имитационной модели обработки прибывшего на морской терминал импортного контейнерного потока в среде MATLAB.

Ключевые слова: имитационная модель, технологический процесс, морской транспорт, международные перевозки, грузовой терминал.

A. Zh. Radochinskaia*

PhD Student

A. A. Yanchenko*

PhD, Tech.

T. E. Malikova*

Dr. Sc., Tech., Associate Professor

* Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi, Vladivostok

SIMULATION OF THE IMPORT BOUND CARGO TRAFFIC PROCESSING AT A CONTAINER TERMINAL IN MATLAB ENVIRONMENT

Issues related to the use of mathematical modeling in the process of making management decisions at a sea container terminal have been looked at. A brief overview of generally accepted approaches to the choice of a mathematical apparatus for describing the subtasks of the technological process of terminal cargo handling has been given. The stages of developing a mathematical model based on the author's methodology for analyzing technological processes for processing import bound cargo traffic at a functioning container terminal have been described in detail. As an example, the process of developing a discrete-event simulation model for processing an import bound container flow arriving at a sea terminal in the MATLAB environment has been considered.

Keywords: simulation model, container terminal, maritime transport, international forwarding, cargo terminal.

Технические науки развиваются в тесной взаимосвязи с математической наукой. С одной стороны, математический аппарат широко применяется для решения научно-технических задач и в своем развитии дает новые возможности для более углубленного изучения технических процессов всевозможной природы [1–3]. С другой стороны, инженерная практика ориентирует и стимулирует развитие соответствующих разделов теоретической и прикладной математики [4–6]. Одним из наиболее эффективных результатов их взаимодействия является применение информационных технологий в производственной деятельности в целом и на морском

транспорте в частности. Несмотря на большое разнообразие конкретных форм этой деятельности, центральное место в ней занимают процессы обработки больших массивов экспериментальных данных и принятия управленческих решений.

Принятие решений в проектировании и управлении технологическими процессами морских портов основывается на анализе технических условий путем деления сложной задачи на более простые подзадачи; на моделировании подзадач из полученного списка [7, 8] с учетом всех возможностей и ограничений в применяемых на терминале технологиях [9–12]; на поста-

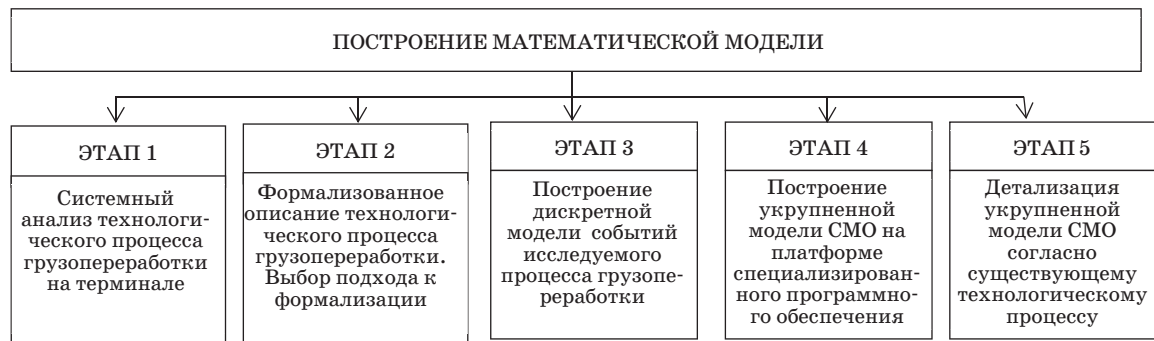


Рис. 1. Построение математической модели имитационного моделирования

новке и проведении научно-технических экспериментов, как в ходе доказательства адекватности разработанных математических моделей реальному прототипу [13], так и в самом процессе симуляции поведения исследуемого объекта.

Немаловажным вопросом является выбор математического аппарата для описания подзадач технологического процесса терминальной обработки груза, поставленных в ходе выполненного анализа, на формализованном языке. В теории математического моделирования производственных систем, в том числе и для морского транспорта, существуют три общепризнанных перехода от словесной постановки задачи к ее формализованному описанию. Во-первых, применяется моделирование технологических процессов на сетевом графике с использованием оценки продолжительности операций. Во-вторых, используется математический аппарат линейного программирования, в частности построение модели производственного планирования параметрического программирования. В-третьих, построение математических моделей основе теории массового обслуживания.

Каждый из перечисленных выше подходов имеет свои недостатки. Так, моделирование технологических процессов с использованием сетевого графика или на основе параметрического программирования позволяет выполнить оценку поведения системы в оптимальной точке, но не позволяет сделать какие-либо выводы о поведении системы в окрестностях этой точки при отклонении от оптимального плана, что более интересно с точки зрения исследования реального процесса. В основе третьего подход (на основе модели массового обслуживания) лежит разбиение технологического процесса на отдельные функциональные участки, оптимизация выполняется отдельно для каждого из них. При этом невозможно оценить влияние каждого из участков на остальные, т. е. выполнить комплексную оптимизацию технологического про-

цесса. В качестве альтернативного варианта математического аппарата для описания подзадач технологического процесса терминальной обработки груза было выбрано дискретно-событийное имитационное моделирование системы массового обслуживания, позволяющее скомпилировать преимущества представленных выше методов и избежать недостатков, не позволяющих учитывать вероятностный характер сроков выполнения каждой операции.

В результате проведенного исследования в Морском государственном университете им. адмирала Г. И. Невельского была разработана авторская методика анализа технологических процессов обработки импортного грузопотока на функционирующем контейнерном терминале, представленная в статье [14], которая позволяет решать комплексную задачу совершенствования процесса терминальной обработки груза. В основание методики положено моделирование процесса обработки импортного грузопотока на контейнерном терминале на платформе пакета MATLAB/Simulink (версии R2017b, лицензия № 970311) с использованием прикладной библиотеки SimEvents. Поэтапная последовательность разработки математической модели имитационного моделирования показана на рис. 1.

Рассмотрим основные этапы построения имитационной модели более подробно на примере модели массового обслуживания импортного контейнерного потока в базовых (существующих) условиях.

Модель была разработана на основе системного анализа применяемых в настоящее время технологических процессов обработки импортного грузопотока на контейнерном терминале Владивостокского морского торгового порта (ПАО «ВМТП»). В качестве формализованного языка описания технологического процесса грузопереработки было принято решение использовать дискретно-событийное моделирование. В результате была разработана модель, по-

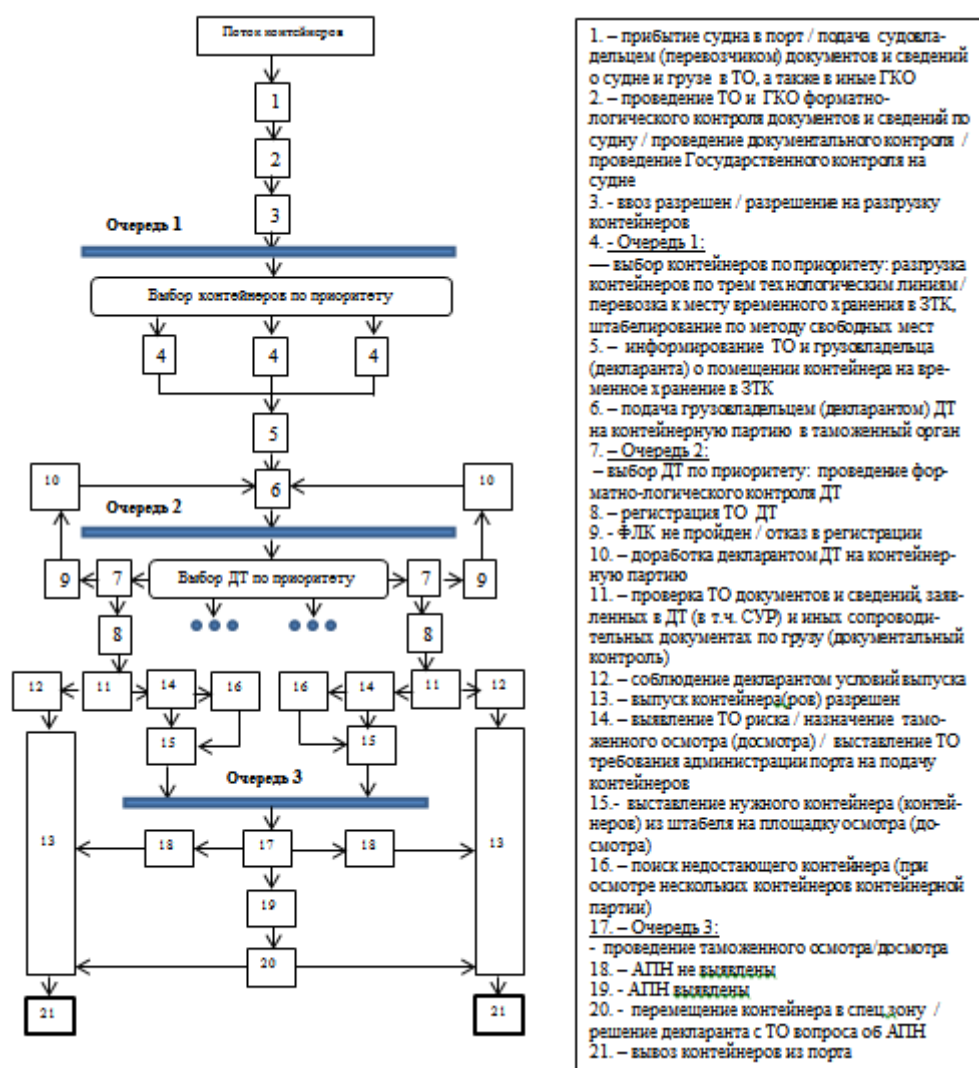


Рис. 2. Дискретно-событийная модель терминальной обработки импортного контейнерного потока в ПАО «ВМТП» [15]

казанная на рис. 2. Подробный алгоритм построения этой модели описан в статье [15].

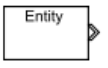
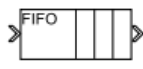


Пакет прикладных программ библиотеки SimEvents из MATLAB/Simulink для численной реализации модели был выбран по следующим соображениям. Во-первых, представляет интерес крайняя гибкость данного инструментария, наглядность и возможность визуализации процесса симуляции. Во-вторых, его использование в задачах имитационного моделирования позволяет создать не просто программный продукт, но и наглядное пособие для обучения персонала терминала работе с имитационными моделями. В-третьих, на основании составленного «каркаса» укрупненной модели системы массового обслуживания (СМО) возможно быстрое и наглядное изменение используемой структуры и алго-

ритмов модели под конкретный технологический процесс. В-четвертых, именно данный программный продукт широко используется в прикладных исследованиях ряда отечественных научных школ при решении актуальных задач морского транспорта [16].

Построение укрупненной модели СМО обработки контейнерного потока на терминале с подробным описанием ее элементов (блоков), последовательности их соединений, а также параметры настройки каждого блока представлены в статье [14]. Следует отметить, что для понимания этапа детализации согласно технологическому процессу терминальной обработки импортного контейнерного потока в ПАО «ВМТП» достаточно напомнить обязательные элементы

Таблица 1

Элементы обобщенной модели процесса обработки контейнерного потока на терминале порта

Название элемента	Вид элемента	Моделируемая функция (основные технологические операции)
Генератор <i>Entity Generator</i>	 Entity Generator	Генерирование поступления заявок в систему (выгрузка контейнеров с борта судна портальным краном)
Очередь <i>Entity Queue</i>	 Entity Queue	Принимает на вход заявку (ожидание транспортировки контейнеров в зону хранения)
Сервер <i>Server</i>	 Entity Server	Обслуживание заявок (вывоз контейнеров в зону хранения, а также штабелирование)
Приемник <i>Terminator</i>	 Entity Terminator	Прием и уничтожение заявок (хранение контейнеров до выдачи грузополучателю)

укрупненной модели СМО, а также моделируемые ими функции (табл. 1).

В ходе адаптации обобщенной модели под исследуемый технологический процесс на основании информации полученной из дискретно-событийной модели (рис. 2) были добавлены дополнительные блоки симулирующие выполнение индивидуальных операций, присущих конкретному исследуемому процессу, а также частично внесены изменения в последовательность соединения элементов модели СМО. В уже

имеющийся набор элементов (таблица) был добавлен новый элемент «Маршрутизатор заявок» (*Input Switch*), не входивший изначально в укрупненную модель СМО. Его функциональное предназначение – разделить весь поток заявок на два частных потока в соответствии с дальнейшими индивидуальными технологическими операциями, выполняемыми для каждого конкретного контейнера (заявки), либо поиск нужного контейнера в зоне хранения и вывоз его на площадку таможенного осмотра (до-

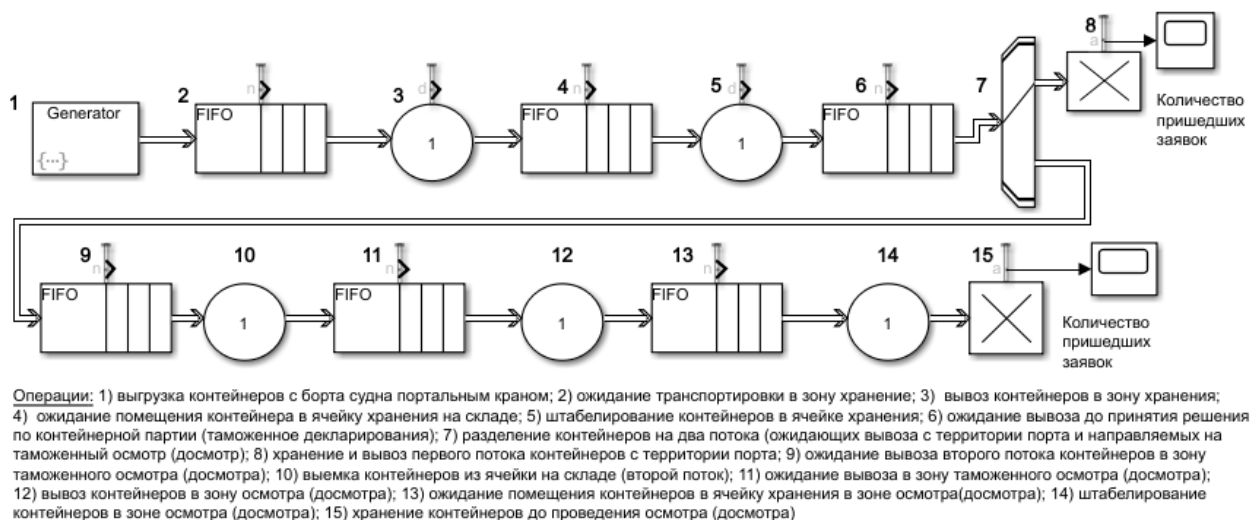


Рис. 3. Имитационная модель процесса терминальной обработки импортного контейнерного потока в морском порту, разработанная в MATLAB/Simulink

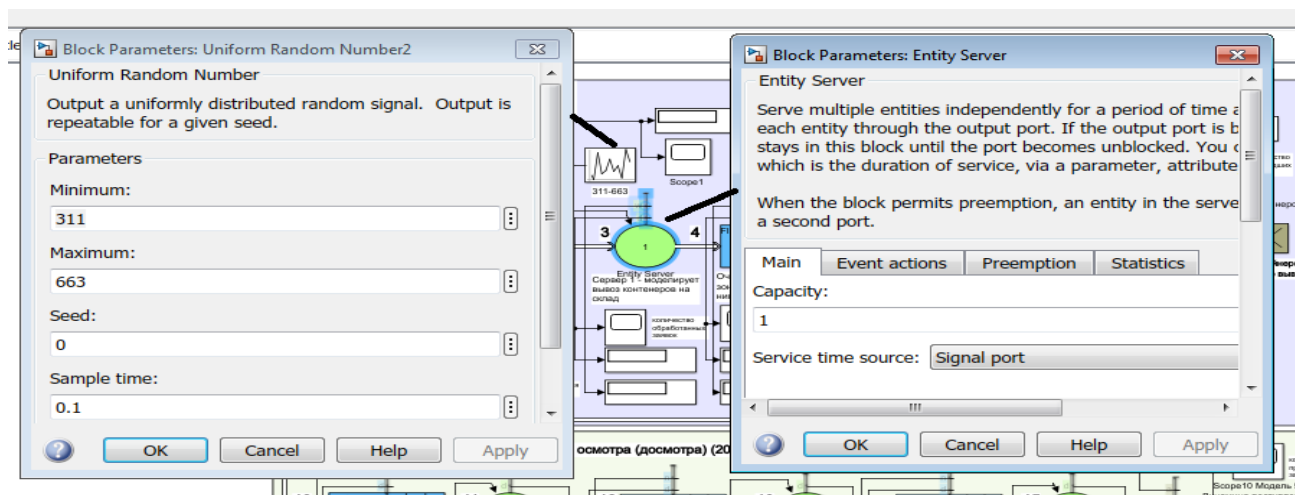


Рис. 4. Установка параметров блока Канал обслуживания (Entity Server)

смотр), либо операция хранения контейнера до момента выдачи его грузополучателю. Окончательный вариант имитационной модели существующего процесса терминальной обработки импортного контейнерного потока показан на рис. 3.

На рис. 4 приведен пример настройки параметров одного из блоков модели, а именно Канал обслуживания (Entity Server). При этом входные данные и правила обслуживания заявок определялись на основе исходных данных контейнерного терминала ПАО «ВМТП», таких как складские площади терминала, контейноровместимость, наличие терминальной техники и оборудования для обработки прибывающего контейнерного потока и т. п.

Полученные результаты проверки имитационной модели на валидацию и верификацию подтвердили ее соответствие реальному прототипу и достоверность получаемых результатов модельных экспериментов. Имитационная модель может быть использована в практической деятельности для диагностики состояния системы управления потоковыми процессами в зоне хранения действующего контейнерного терминала и принятия обоснованных управленческих решений.

Описание технологических процессов на языке дискретно-событийного моделирования позволяет осуществлять адаптацию обобщенной схемы модели системы массового обслуживания под различные последовательности операций, что подтверждает пригодность использования предложенного подхода к моделированию частных задач с учетом всех возможностей и ограничений в применяемых на терминале технологиях. Таким образом, разработан типо-

вой инструментарий для анализа и синтеза технологических процессов обработки импортного грузопотока на функционирующем терминале.

Библиографический список

1. Вольнов И. Н., Шпак А. С. Катастрофа сборки и моделирование морских динамических объектов в экстремальных ситуациях // Вестн. Волж. гос. академии водного транспорта. 2018. № 57. С. 184–190.
2. Эглит Я. Я. и др. Математическое моделирование выбора варианта доставки груза транспортно-экспедиторскими компаниями // Эксплуатация морского транспорта. 2019. № 1 (90). С. 15–22. DOI: 10.34046/aumsuomt90-3.
3. Маликова Т. Е., Москаленко М. А. Исследование системы обеспечения технологической безопасности морских судов методами теории катастроф // Науч. проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 94–97.
4. Галин А. В., Малыхин А. С. Поиск унифицированного метода для маршрутизации судов при сбое работы линейного контейнерного сервиса // Логистика: современные тенденции развития: Материалы XVIII Международ. науч.-практ. конф. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2019. С. 90–100.
5. Маликова Т. Е. Использование теории графов при разработке математических моделей систем «сдвигающийся груз – спецустройство» // Науч. проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 2. С. 39–42.
6. Майоров Н. Н. Прогнозирование процессов морского пассажирского терминала в классе полиномиальных моделей // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 3. С. 113–122. Doi: 10.24143/2073-1574-2018-3-113-122.

7. Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Eglit J. J. Simulation Model of Container Land Terminals // TransNav. 2018. Vol. 12, No 2. – P. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
8. Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Slitsan A. E. Simulation for assessment of bulk cargo berths number // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2017. Vol. 87. Is. 6. P. 062010. DOI: 10.1088/1755-1315/87/6/062010.
9. Кузнецов А. Л., Щербакова-Слюсаренко В. Н., Эглит Я. Я. Разработка методики расчета потребности в ресурсах, необходимых для выполнения складских операций // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2017. Т. 9, № 4. С. 724–734. Doi: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-724-734.
10. Янченко А. А., Маликова Т. Е., Кузьмин А. В. Алгоритм оформления судна в порту по технологии предварительного информирования таможенных органов в условиях свободного порта Владивосток // Территории опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации и свободный порт Владивосток: сб. науч. тр. X Регион. науч. конф., посвященной 25-летию ФТС России / под общ. ред. проф. В. И. Дьякова; науч. ред. М. В. Ниязова; Российская таможенная академия, Владивосток. филиал Российской таможенной академии, 2016. С. 257–262.
11. Маликова Т. Е., Янченко А. А. Применение технологии предварительного информирования таможенных органов при морских внеплановых грузоперевозках // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2016. № 3 (37). С. 33–45. Doi: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-33-45.
12. Эглит Я. Я. и др. Выявление аварийных ситуаций при использовании портового перегрузочного оборудования с помощью заданного алгоритма // Транспорт. дело России. 2018. № 6. С. 213–216.
13. Янченко А. А., Маликова Т. Е., Оськин Д. А. Экспериментальные исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы в условиях свободного порта Владивосток // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2019. Т. 11, № 1. С. 57–67.
14. Янченко А. А. Методика анализа технологического процесса обработки груза на контейнерном терминале / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 2 (95). С. 20–26.
15. Янченко А. А., Маликова Т. Е. Дискретно-событийная модель в задачах эксплуатации контейнерных терминалов // Эксплуатация морского транспорта. 2017. № 4 (85). С. 25–31.
16. Тимошек Е. С. Решение задач расстановки флота в среде MATLAB в учебном процессе морских вузов // Вестн. гос. морского ун-та им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. 2019. – № 4 (29). С. 25–30.

УДК 656.6

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-150-152

Е. А. Таратун*

ассистент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Рассмотрена городская инфраструктура водного транспорта, водные маршруты, существующие в Санкт-Петербурге, проект «Городские причалы», перспективы развития инфраструктуры водного транспорта и водной отрасли.

Ключевые слова: водный транспорт, перевозки водным транспортом, туристические маршруты, водные пути, городская инфраструктура водного транспорта, причалы.

Е. А. Taratun*

Assistant

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF URBAN INFRASTRUCTURE OF WATER TRANSPORT IN ST. PETERSBURG

The article considers the urban water transport infrastructure, water routes existing in St. Petersburg, the project «City Berths», prospects for the development of water transport infrastructure and the water industry.

Keywords: water transport, water transport, tourist routes, waterways, urban water transport infrastructure, berths.

Санкт-Петербург располагается на берегах Финского залива Балтийского моря и обладает разветвленной сетью рек и каналов. Общая протяженность всех водных объектов на территории Санкт-Петербурга достигает 282 км, а их поверхность составляет около 7% всей площади города.

С учетом географических особенностей, Санкт-Петербург является уникальным городом, на территории которого водные объекты, используемые в целях судоходства, подразделяются на:

- внутренние морские воды, включая акватории морских портов (находятся в федеральном ведении: ФГБУ Администрация морских портов Балтийского моря);

- внутренние водные пути Российской Федерации (р. Нева и ее притоки), находятся в зоне ответственности ФБУ «Администрация „Волго-Балт“»;

- водные пути Санкт-Петербурга.

В Санкт-Петербурге действует Закон Санкт-Петербурга № 175-38 от 13.05.2009 г. «О транспортном обслуживании населения водным транспортом в Санкт-Петербурге», который ввел понятие «водные пути Санкт-Петербурга», т. е. установил наименование водных объектов в границах Санкт-Петербурга, используемых

в целях судоходства и не относящихся к ВВП РФ, а также определил полномочия органов государственной власти Санкт-Петербурга по организации транспортного обслуживания населения водным транспортом в Санкт-Петербурге [1].

Рассматривая причальную инфраструктуру на территории Санкт-Петербурга, условно можно выделить:

- плавучие причалы;
- причалы-спуски;
- стационарные причалы, предназначенные для обслуживания пассажиров;
- грузовые причалы;
- технические причалы для отстоя и обслуживания судов;
- причалы яхт-клубов для стоянки прогулочных и спортивных судов.

Отдельно необходимо обратить внимание причальную инфраструктуру яхт-клубов для стоянки прогулочных и спортивных судов. На территории Санкт-Петербурга насчитывается порядка 40 яхт-клубов и лодочных станций для стоянки прогулочных и спортивных судов, которые являются коммерческими.

Городские набережные находятся в государственной собственности Санкт-Петербурга и являются имуществом казны Санкт-Петербурга.

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 10.07.2001 г. № 527, большинство участков набережных являются объектами исторического и культурного наследия федерального (общероссийского) значения [2].

В Санкт-Петербурге существуют разные типы экскурсионно-прогулочных маршрутов, которые устанавливают судовладельцы. Указанные маршруты, в зависимости от условий (продолжительности, протяженности, программы), можно условно разделить на виды:

- транспортные – транзитные, местные, пригородные, внутригородские маршруты перевозок пассажиров и переправы;
- туристские – маршруты перевозок пассажиров продолжительностью более чем 24 ч;
- экскурсионно-прогулочные – маршруты перевозок пассажиров продолжительностью не более чем 24 ч.

При разработке новых туристических маршрутов следует учитывать ряд факторов, связанных с особенностями существующей инфраструктуры, особенностями работы игроков рынка, предпочтениями пассажиров, действующими и перспективными пассажиропотоками, существующими и возможными стратегиями пространственного развития Санкт-Петербурга, включающими вопросы реновации промышленных зон, создания новых общественных пространств и повышения туристической привлекательности территорий.

Потенциал центральных водных маршрутов Санкт-Петербурга практически исчерпан. У главных культурно-исторических и туристических объектов уже проходят десятки маршрутов, по малым рекам и каналам большинство маршрутов совпадает (отличаются только начальные и конечные пункты).

В целях развития маршрутной сети внутреннего водного транспорта в 2014 г. был запущен проект «Городские причалы Санкт-Петербурга». В рамках реализации проекта организовано 18 городских причалов (в 2019 г.) [5] общего пользования с широкой географией их размещения, как в наиболее востребованных местах в исторической части города, так и в местах расположения рекреационных и культурно-развлекательных объектов. Городские причалы Санкт-Петербурга дают право доступа судовладельцам к причальной инфраструктуре для посадки/высадки пассажиров.

Проект позволяет обеспечить уровень свободной конкуренции как юридических, так и физических лиц, повышает туристическую привлекательность Санкт-Петербурга и положитель-

но влияет на снижение средней стоимости поездки. Кроме того, проект «Городские причалы Санкт-Петербурга» способствует появлению новых экскурсионно-прогулочных маршрутов, путем размещения городских причалов общего пользования в разных частях города. При этом система оплаты и бронирования швартовок является абсолютно прозрачной, все средства от швартовок поступают в бюджет Санкт-Петербурга [3].

Для удобства осуществления подходов к городским причалам Санкт-Петербурга судовладельцы могут воспользоваться онлайн-сервисом для бронирования услуги по швартовке к городским причалам общего пользования на сайте www.prichal-spb.ru [3]. Таким образом, судовладельцы могут планировать свою деятельность на долгосрочный период и при необходимости оперативно вносить изменения (в случае изменения погодных условий, уровня воды и по техническим причинам).

Предпосылки для запуска проекта:

- 1) отсутствие причальной инфраструктуры общего пользования, недостаточное количество причалов, предназначенных для приема пассажирских судов, работающих на экскурсионно-прогулочных маршрутах;
- 2) недостаточное развитие маршрутной сети водного транспорта в Санкт-Петербурге.

Задачи проекта:

- 1) повышение качества и доступности услуг по перевозке пассажиров водным транспортом;
- 2) удовлетворение потребностей жителей и гостей города в водных пассажирских перевозках;
- 3) развитие туристической отрасли путем продвижения маршрутов водного транспорта в Санкт-Петербурге, проходящих через городские причалы общего пользования;
- 4) повышение информированности о маршрутах водного транспорта в Санкт-Петербурге.

Часть причалов оборудована инновационными комплексами «Умный причал», позволяющими осуществлять автоматический подсчет количества осуществленных швартовок, дистанционно управлять доступом на причал, осуществлять видеонаблюдение за обстановкой на причале.

Для мониторинга движения водного транспорта используются «Системы мониторинга, анализа и управления судами» (СМАУС). СМАУС включает в себя камеры и светофоры, установленные на мостах, и систему Автоматической идентификации судов. Все камеры задействованы в городской Автоматизированной информационной системе обеспечения безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербурга [4].

Перспективы развития

Конечно, в области инфраструктуры водного транспорта и водных перевозок существует множество проблем, при этом стоит рассмотреть перспективные вопросы, такие как:

- разработка платформы для продажи билетов на экскурсионно-прогулочные маршруты. Данная платформа подразумевает сбор информации обо всех существующих маршрутах в городке, в том числе их стоимость, протяженность, маршрут, а также возможность покупки билета. Это позволит туристам и жителям города заранее ознакомиться со всеми условиями;

- перевод судов на электродвигатели. На сегодняшний день все речные суда, эксплуатирующиеся в Санкт-Петербурге, оборудованы судовыми дизельными двигателями, которые имеют значительную шумность и осуществляют выброс отработанных газов в атмосферу, что крайне негативно сказывается на чистоте воздуха особенно в центральной части Санкт-Петербурга.

Учитывая данные обстоятельства, перспективным направлением в развитии внутреннего водного транспорта в Санкт-Петербурге является перевод судов на электротягу. На сегодняшний день существует ряд проектов судов на электродвигателях. Кроме того, в навигационный период 2020 г. в Санкт-Петербурге проводилась тестовая эксплуатация электрического пассажирского судна.

Увеличение причальной инфраструктуры в рамках проекта Городские причалы. В соответ-

ствии со статистической информацией, расположенной на официальном сайте оператора причалов, проект показывает положительную динамику. Так, в год реализации проекта в 2014 г. число швартовок к причалам составило 398 ед., в 2019 г. данная цифра составила 25886 ед. [5]. В связи с чем можно сделать вывод о популярности данного проекта среди судовладельцев.

Библиографический список

1. Закон Санкт-Петербурга № 175-38 от 13.05.2009 года «О транспортном обслуживании населения водным транспортом в Санкт-Петербурге». URL: <https://www.assembly.spb.ru/ndoc/doc/0/706141951?print=0> (дата обращения: 08.10.2020).
2. Постановление Правительства РФ от 10 июля 2001 г. № 527 «О перечне объектов исторического и культурного наследия федерального (общероссийского) значения, находящихся в г. Санкт-Петербурге». URL: <http://docs.cntd.ru/document/901793811> (дата обращения: 08.10.2020).
3. Причалы Санкт-Петербурга – Бронирование и оплата швартовок. URL: <https://prichal-spb.ru/> (дата обращения: 08.10.2020).
4. Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга. URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/vneshnij-transport/rechnoj-transport/ (дата обращения: 08.10.2020).
5. СПб ГКУ «Агентство внешнего транспорта». URL: <http://avt.spb.ru/vodnyj-transport/> (дата обращения: 08.10.2020).

УДК 656.025.4

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-153-158

И. С. Титов*

магистрант

С. В. Уголков*

кандидат военных наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ ОБРЕЗНЫХ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В МЕЖДУНАРОДНОМ СООБЩЕНИИ

Рассматриваются вопросы организации перевозки пиломатериалов. Проводится детальный анализ перевозки специализированного транспортного пакета. Сравнительным анализом коммерческих показателей перевозки определяется наиболее оптимальный вариант доставки оборудования.

Ключевые слова: транспорт, пиломатериалы, подвижной состав, контейнер, транспортный пакет.

I. S. Titov*

Postgraduate Student

S. V. Ugolkov*

PhD, Military, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF EDGED PROFILED LUMBER IN INTERNATIONAL TRAFFIC

The article discusses the organization of lumber transportation. A detailed analysis of the specialized tranche of the package is carried out. A comparative analysis of commercial transport indicators determines the best option for the delivery of equipment.

Keywords: transport, lumber, rolling stock, container, transport package

Россия – одна из самых богатых по лесным запасам стран мира. На ее долю приходится 22% лесного покрова планеты, половина мировой доли хвойной древесины.

Особенностью лесопромышленного комплекса России является то, что при огромной территории и слаборазвитой транспортной инфраструктуре большинство лесозаготовительных и лесоперерабатывающих предприятий сильно удалено от потребителей, что определяет значимость транспортных расходов в экономике предприятий и значительные потери материалов в лесной промышленности. Важным параметром, определяющим дальность доставки лесоматериалов, является их ассортимент и степень обработки. Чем выше качество и степень обработки, тем выше дальность их транспортировки, хотя экспортируется большая доля именно круглых лесоматериалов.

В наши дни все больше набирают популярность бани и сауны. Парные пользуются спросом не только в пределах России, но и по всей планете. В том числе это касается и одной из самых развитых стран мира – Китая. В Даляне су-

ществует так называемая Русская улица, на которой появляется все больше восточно-европейского антуража, а, как известно во всем мире, выходцы из стран бывшего СССР очень любят отдыхать в банях и саунах.

Чтобы построить хороший банный комплекс, понадобится немало древесины для облицовки помещений, в том числе и парных. Наилучшей внутренней обшивкой для бани или сауны является деревянная вагонка, которой может использоваться не только в самой парной, но и в прилегающих помещениях. Для облицовки внутренних стен могут сгодиться самые разные породы дерева. Для финской сауны отлично подойдет береза, за счет своей невысокой стоимости, относительно других пород на рынке. Также эта древесина обладает повышенной прочностью, износостойкостью древесины в условиях низкой влажности и плюсовых температур определяется, как высокая, хороший материал для паркета.

В данной работе рассматривается отправка 20 т вагонки из Вологды в Далянь (КНР). На дальние расстояния вагонку перевозят по морю,

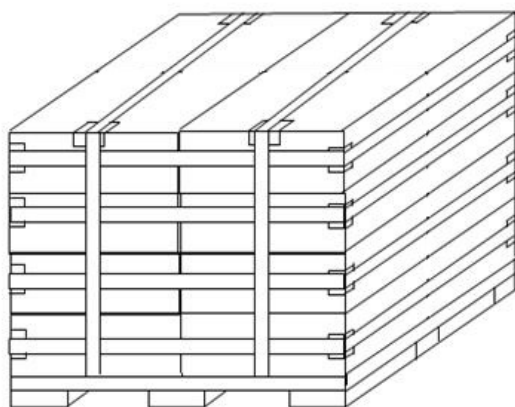


Рис. 1. Транспортный пакет

а также железнодорожным и автомобильным транспортом. Для создания транспортного пакета необходимо погрузить лесоматериалы на поддон и закрепить их средством пакетирования [1].

Размеры поддона равны: длина (a) – 1200 мм; ширина (b) – 800 мм; высота (h) – 150 мм.

Соответственно, площадь поддона равна:

$$S = a \cdot b; \quad (1)$$

$$S = 800 \cdot 1200 = 960\,000 \text{ мм}^2 = 0,96 \text{ м}^2.$$

За высоту пакета будет принята максимально допустимая, т. е. 1,8 м. На основании того, что высота поддона 15 см, высота груза должна быть не более 165 см [2].

$$h_{\text{груза}} = 1,65 \text{ м.}$$

Объем груза на одном поддоне равен:

$$V_{\text{одного пакета}} = S_{\text{поддона}} \cdot h_{\text{груза}}. \quad (2)$$

$$V_{\text{одного пакета}} = 0,96 \text{ м}^2 \cdot 1,65 \text{ м.}$$

$$V_{\text{одного пакета}} = 1,584 \text{ м}^3.$$

N – количество транспортных пакетов:

$$N = \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{одного пакета}}}, \quad (3)$$

$$N = \frac{33,4}{1,584},$$

$$N = 21,1 \approx 22.$$

Таким образом, для транспортировки 20 т сухой вагонки понадобится 22 транспортных места. Для данного количества транспортных мест лучше всего подойдет 40-футовый контейнер [3].

Для перевозки автотранспортом использован седельный тягач VolvoFH16 с полуприцепом-контейнеровоз Тонар-97462, изображенные на рис. 3; 4.

40" High Cube



Рис. 2. 40-футовый контейнер

Для морской перевозки применено судно «Капитан Кириченко» 1990 г., которое показано на рис. 5.

Для транспортировки железнодорожным транспортом была использована контейнерная платформа модели 13-192 (рис. 6).

В данной работе рассматривается перевозка 20 т вагонки тремя различными маршрутами.

Маршрут № 1. Автомобильная перевозка контейнера из Вологды до Санкт-Петербурга, далее на морском судне до Даляня (рис. 3) [4].

После погрузки в Вологде автотранспорт следует в Большой порт Санкт-Петербург, который находится в 680 км и обойдется в 931 USD и занимает 2 суток пути. Маршрут данной перевозки показан на рис. 7 [5].

В Санкт-Петербурге оплачивается портовый сбор в размере 239 USD, после чего контейнер ожидает погрузку на борт судна и оформления

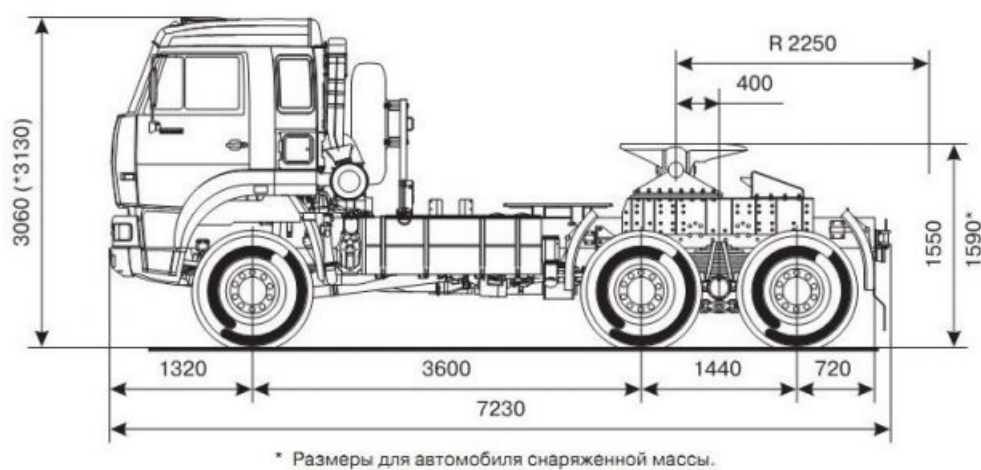


Рис. 3. Сдельный тягач VolvoFH16

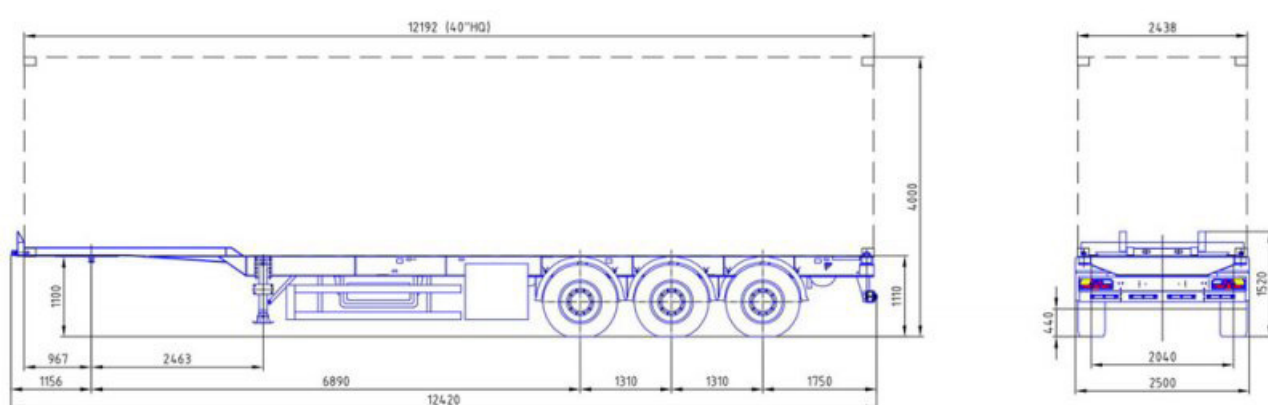


Рис. 4. Полуприцеп-контейнеровоз Тонар-97462



Рис. 5. Морское судно «Капитан Кириченко»

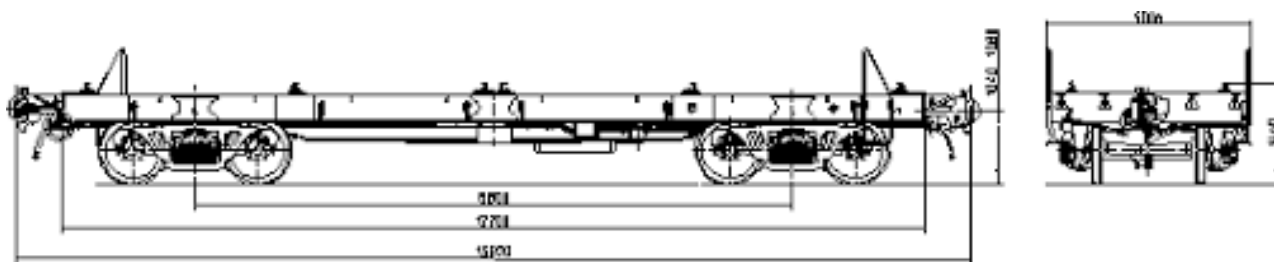


Рис. 6. Контейнерная платформа 13-192

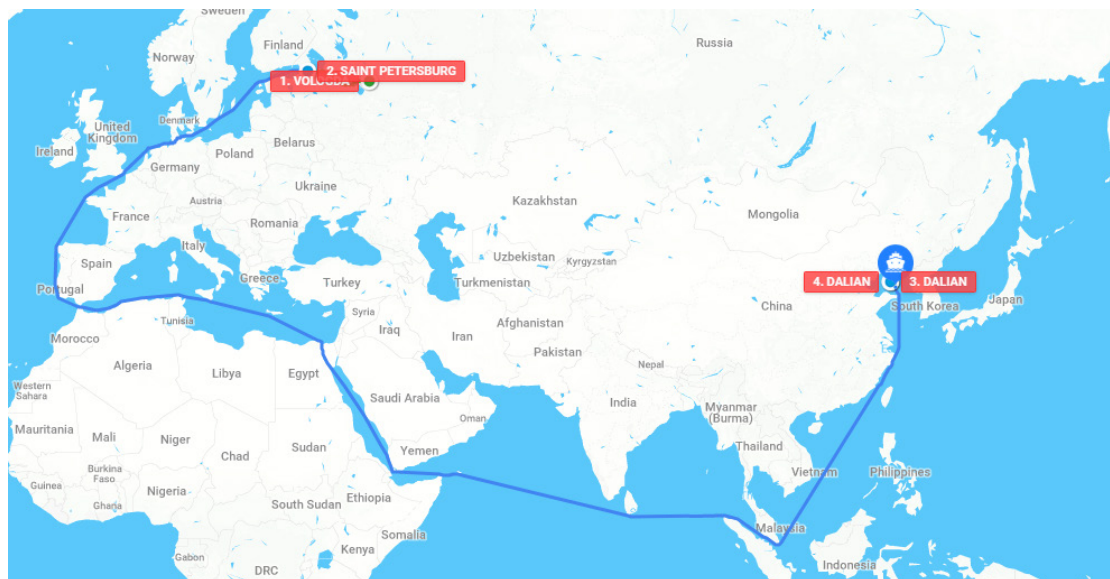


Рис. 7. Маршрут №1

документов. Примерное время нахождения груза в порту – 1–2 дня.

После выхода из порта судно следует в Балтийское море, затем через Кильский канал выходит в Северное море. Далее, пройдя Гибралтарский пролив, оказывается в Средиземном море, отсюда следует в Суэцкий канал. Затем пройдя Красное, Аравийское и Лаккадивское моря входит в Малаккский пролив, откуда уже следует вдоль берегов Китая непосредственно в порт Далянь.

Таким образом, пройдя 22102 км, спустя 38 суток груз прибывает в порт Далянь.

В порту Даляня, как и в Санкт-Петербурге, оплачивается портовый сбор в размере 150 USD, после чего груз ожидает разгрузку и подготовку к дальнейшей транспортировке. Время нахождения в порту под разгрузкой приблизительно занимает 1–2 дня.

Маршрут № 2. Автомобильная перевозка из Вологды через Россию, Казахстан и КНР (рис. 8).

В данном случае транспортировка по маршруту Вологда – Далянь рассматривается с использованием одного лишь автотранспорта.

Протяженность этого пути составит около 8000 км и займет около 5,5 суток.

Маршрут № 3. Контейнерная железнодорожная перевозка через Россию и КНР Ворсино – Забайкальск – Далянь (рис. 9) [6].

В данном случае будет задействован ускоренный регулярный контейнерный рейс, следующий со станции Ворсино (540 км от Вологды) напрямую в Далянь. Маршрутная скорость поезда составляет 900 км/сутки [7].

Протяженность маршрута по российским железным дорогам до пограничного пункта пропуска станция Забайкальск составит 6634 км, по железным дорогам Китая от станции Манчжурия до станции Далянь составит 1900 км. Время нахождения груза в пути следования составляет 10 суток. Под погрузочно-выгрузочными операциями, время нахождения в железнодорожных узлах и время прохождения таможенных процедур на пограничных станциях 4 суток. Итого 14 суток.

Определение наиболее оптимального варианта перевозки груза кроме стоимостных и временных показателей также будет производиться

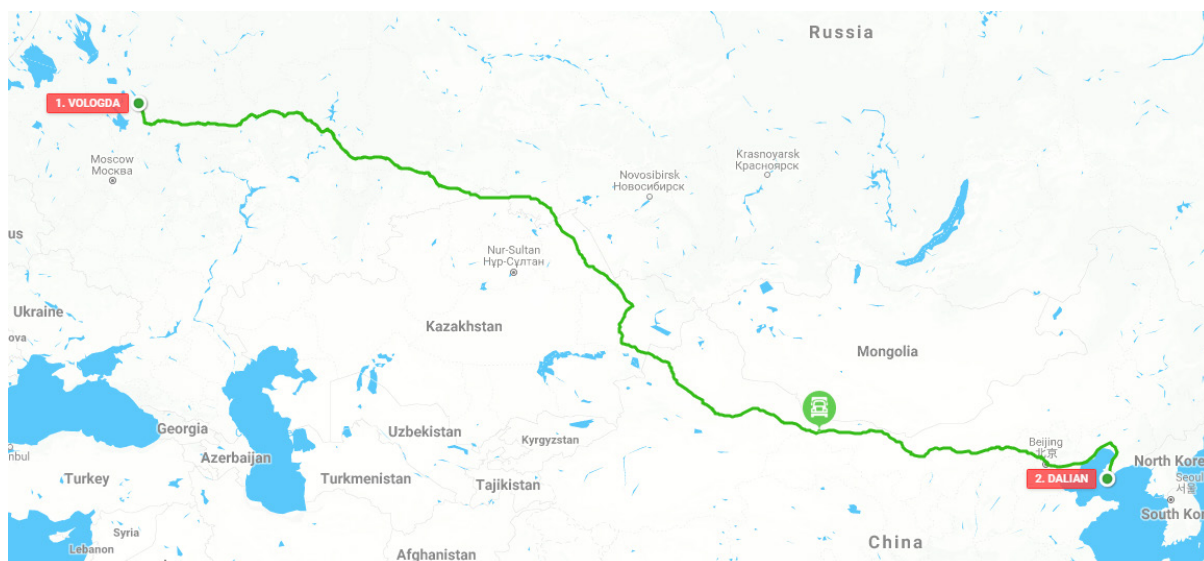


Рис. 8. Маршрут № 2

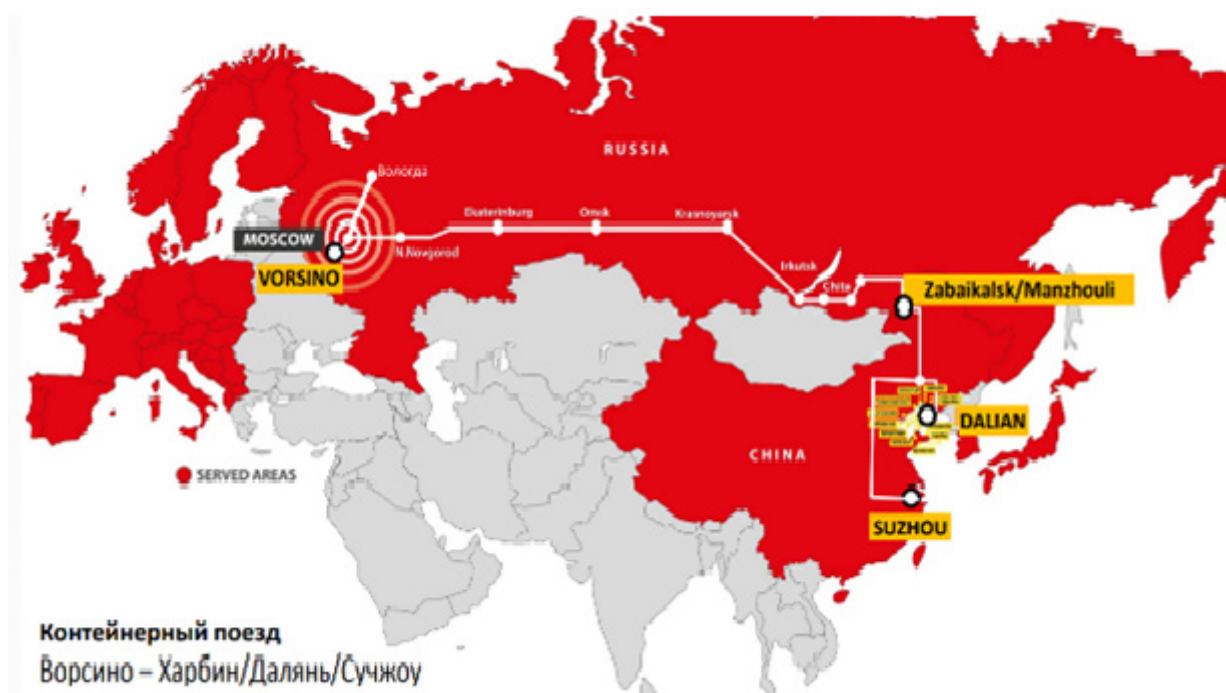


Рис. 9. Маршрут № 3

по показателю сравнению отношений суммарной стоимости перевозки на n маршруте (E_n) к стоимости перевезенного груза (C), Общий вес всей отправки составляет 20 т. Стоимость вагонки для отделки бань артикула термоосина, Экстра, 15×90×2500 мм бесшпунная составляет 46000 р. за 1 т, т. е. стоимость всей партии составляет 920000 р.

Показатели отношения стоимости перевозки к стоимости груза R_n :

$$R_n = \frac{E_n}{C}, \quad (4)$$

где E_n – суммарная стоимость перевозки на n маршруте, руб.; C – общая стоимость отправки, руб, по формуле (4):

$$R_1 = \frac{290526,87}{920000} = 0,316; \quad R_2 = \frac{499546}{920000} = 0,543;$$

Сравнительные результаты реализации маршрутов

Маршрут	Вид транспорта	Количество подвижного состава, вид	Расстояние пути, км	Время 1 ездки, сутки	Стоимость, руб.	Отношение стоимости перевозки к стоимости груза, %
№ 1 (авто; море)	№ 1а: Вологда – Санкт-Петербург	Сдельный тягач VolvoFH16, полуприцеп-контейнеровоз Тонар-97462	22782	40	290526,87	32
	№ 1б: Санкт-Петербург – Далянь	Морское судно «Капитан Кириченко»				
№ 2 (авто)	№ 2: Вологда – Далянь	Сдельный тягач VolvoFH16, полуприцеп-контейнеровоз Тонар-97462	8000	6	499546	54
№ 3 (ж/д)	№ 3: Вологда – Далянь	Контейнерная платформа 13-192	9074	14	284611	31

$$R_3 = \frac{284611}{920000} = 0,309.$$

Сравнительные результаты использования маршрутов по стоимостным и временным показателям представлены в таблице.

По данным таблицы можно сделать вывод, что оптимальным маршрутом перевозки вагонки из Вологды в Далянь, является третий маршрут, он почти в 2 раза дешевле второго и чуть дешевле первого маршрута по экономическим показателям, также он является оптимальным по соотношению стоимости перевозки к цене товара.

В данной статье произведено описание груза, выбор его тары и упаковки, а также был определен перевозимый объем партии товара. Раскрыта технология пакетирования груза укрупненными грузовыми единицами. Также были подробно рассмотрены три маршрута перевозки из Вологды в Далянь на различных видах транспорта. Произведен расчет стоимости и сроков перевозки груза для морского, автомобильного, железнодорожного транспорта на различных маршрутах. Проанализировав полученные расчетом данные, был определен оптимальный маршрут для перевозки вагонки из Вологда в Далянь.

Библиографический список

- ГОСТ ISO 445-2013 Средства пакетирования. Поддоны. Термины и определения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200107444> (дата обращения: 29.11.2020).
- ГОСТ 21391 – 84 – Средства пакетирования, термины и определения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004243> (дата обращения: 29.11.2020)
- Размещение и крепление грузов в транспортных пакетах. URL: kapitanshmelev.ru/ru/stati/18 (дата обращения: 29.11.2020).
- Marinetraffic. URL: <https://www.marinetraffic.com/-MarineTraffic> (дата обращения: 03.12.2020).
- Маршрут морского и железнодорожного транспорта. URL: <https://www.searates.com> (дата обращения: 30.11.2020).
- Расчет расстояния железнодорожного маршрута. URL: <https://glogist.ru/site/calculateDist> (дата обращения: 30.11.2020).
- Ускоренные регулярные контейнерные поезда Китай – Россия – Китай. URL: <http://www.rzdlog.ru/upload/medialibrary/ea1/ea1cb77ef7e0b6f2a8791f50f8f7338c.pdf> (дата обращения: 29.11.2020).

УДК 656.025.4

Д. О. Федотов*

магистрант

С. В. Уголков*

кандидат военных наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ ФАРФОРОВЫХ СЕРВИЗОВ ИЗ ДРЕЗДЕНА В САМАРУ

Рассматриваются вопросы организации перевозки наиболее экономически выгодного способа транспортировки тарно-штучного груза из Дрездена в Санкт-Петербург. Детально разработаны маршруты перевозки груза на морском, речном, автомобильном и железнодорожном транспорте, изучены документация и технология данной перевозки, проведен расчет провозной платы для каждого варианта перевозки. В ходе анализа полученных данных выбран оптимальный маршрут перевозки.

Ключевые слова: дрезденский фарфоровый сервиз, транспорт, организация перевозки, документация, груз, контейнер, анализ данных, таможенные платежи, расчет стоимости перевозки.

D. O. Fedotov*

Postgraduate Student

S. V. Ugolkov*

PhD, Military, Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF PORCELAIN SETS FROM DRESDEN TO SAMARA

The article deals with the organization of transportation of the most cost-effective method of transportation of bulk cargo from Dresden to St. Petersburg. The routes of cargo transportation by sea, river, road and rail transport were developed in detail, the documentation and technology of this transportation were studied, and the transportation fee was calculated for each transportation option. During the analysis of the received data, the optimal transportation route was selected.

Keywords: Dresden porcelain service, transport, transportation organization, documentation, cargo, container, data analysis, customs payments, transportation cost calculation.

Основным представителем тонкой керамики является фарфор. Особенность фарфора заключается в том, что он имеет белый цвет с небольшим синеватым оттенком, малую пористость и высокую прочность, не восприимчивость к высоким температурам и химическим воздействиям. Химический состав меняется в зависимости от назначения изделия.

Дрезденский фарфор пользуется высоким спросом у российского потребителя и как предметы обихода и искусства, так и предметы выставочной деятельности. В связи с чем в российские города идут регулярные поставки этого товара, в том числе и в Самару.

В статье:

- проанализирована грузовая и транспортная характеристика Дрезденского фарфорового сервиза;

- определена разовая грузовая партия перевозки Дрезденского фарфорового сервиза;

- определены транспортные средства на видах транспорта;

- рассчитаны провозные платежи на видах транспорта по выбранным маршрутам и сроки перевозки;

- выбран оптимальный маршрут перевозки на основе сравнительного анализа экономических и временных показателей перевозки.

Маркировка на фарфоровые изделия согласно ГОСТ 28389-89, должна быть нанесена, на тару и изделие. В маркировке указан товарный знак. При формировании изделия устанавливается товарный знак, наносимый на дне изделия при помощи обжига керамической краски, не меньше 1,5 см.

Потребительская тара содержит информацию: товарный знак предприятия изготовившее продукцию, наименование изделия, сорт, дата упаковывания, количество содержимого товара в упаковке, обозначение нормативного документа на изделия.

Таблица 1

Характеристики морских контейнеровозов [3]

Параметр/ Класс контейнера	Вместимость, TEU	Макс. длина, м	Макс. осадка, м
Фидерные контейнеровозы			
HandysizeClass	260–1000	160	8
Океанского плавания:			
HandymaxClass	1000–1700	200	10
FeederClass	1700–2500	245	11
PanamaxClass	2500–4000	294	12
Post-PanamaxClass	4000–7000	320	12,5
Sub-PanamaxClass	7000–13000	397	15,5

Таблица 2

Технические характеристики контейнеровоза «ContainershipsVI» [4]

Показатели	Характеристики
Грузоподъемность, т	13 645
Длина (ОДС), м	154,5
Дедвейт, т	13 520
Ширина, м	21,8
Осадка, м	9
Высота борта, м	12,1
Макс. скорость, уз.	20,5 уз.
Киповая грузоподъемность, м ²	15 639
Зерновая грузовместимость, м ²	17 843
TEU	959

Маркировка, наносимая на транспортную упаковку, должна содержать манипуляционные знаки «Хрупкое. Осторожно» по ГОСТ 14192 [1, 2].

Керамическую посуду упаковывают в потребительскую тару – коробку из картона по ГОСТ 12301. Каждое изделие сервиза оборачивают в бумагу, между керамических товаров находится амортизирующий материал. После погружения, упакованного сервиза, в деревянный ящик происходит обтягивают стальной лентой. Масса одного такого ящика составит 20 кг, габариты (580×500×4800).

Изделия транспортируют всеми видами транспорта в крытых транспортных средствах в соответствии с правилами перевозки грузов, действующими на данном виде транспорта. Общий объем поставки, будет составлять 768 ящиков весом по 20 кг.

Для перевозки фарфоровых сервизов на морском и речном виде транспорта, будет рассмотрен контейнеровоз.

Выбор контейнеровоза, производится исходя от размеров, вместимости и габаритов судна. Данные характеристики отображены в табл. 1.

Во время выбора судна нужно учитывать глубину причалов портов отправления и назначения, и знать объем партии поставки.

Из представленных в табл. 1 контейнеровозов примем контейнеровоз класса хэндсайз, в связи с тем, что объем партии небольшой и будет достаточно судна с минимальной контейнеровместимостью.

Контейнеровоз «ContainershipsVI»: год постройки – 1999 г., характеристики приведены в табл. 2.

Смешанная перевозка, дрезденского фарфора будет осуществляться тремя видами транспорта (железнодорожным, морским, автомобильным), для минимизации материальных и

временных затрат на осуществление погрузо-разгрузочных работ в качестве грузовой единицы будет выбран универсальный контейнер.

Порядок приема груза к перевозке

Прием фарфоровой посуды осуществляется в соответствии с установленными требованиями к ее качеству, определяющемуся государственными стандартами на фарфоровые изделия, техническими условиями и отраслевыми стандартами. Согласно данным документам, посуда из фарфора делится на два сорта. Для выявления сорта принимаются во внимание следующие характеристики: размер изделия; вид, размер и местонахождение дефекта на нем, а также количество аналогичных дефектов.

В табл. 3 приведены показатели качества по 40-балльной системе, разработанной для фарфоровых изделий.

Таблица 3

40-балльная система определения качества фарфоровой посуды [1]

Показатель качества	Количество баллов при оценке		
	отлично, 40–37	хорошо, 36–32	удовлетворительно, 31–14
Физико-технические показатели и обработка: цвет (белизна)	167	146	114
Просвечиваемость (при толщине изделия 2,5 мм)	2	2	2
Термостойкость (7–8 теплосмен)	2	2	2
Качество обработки	5	4	3
Форма изделия	12	11	10
Декор	12	11	10



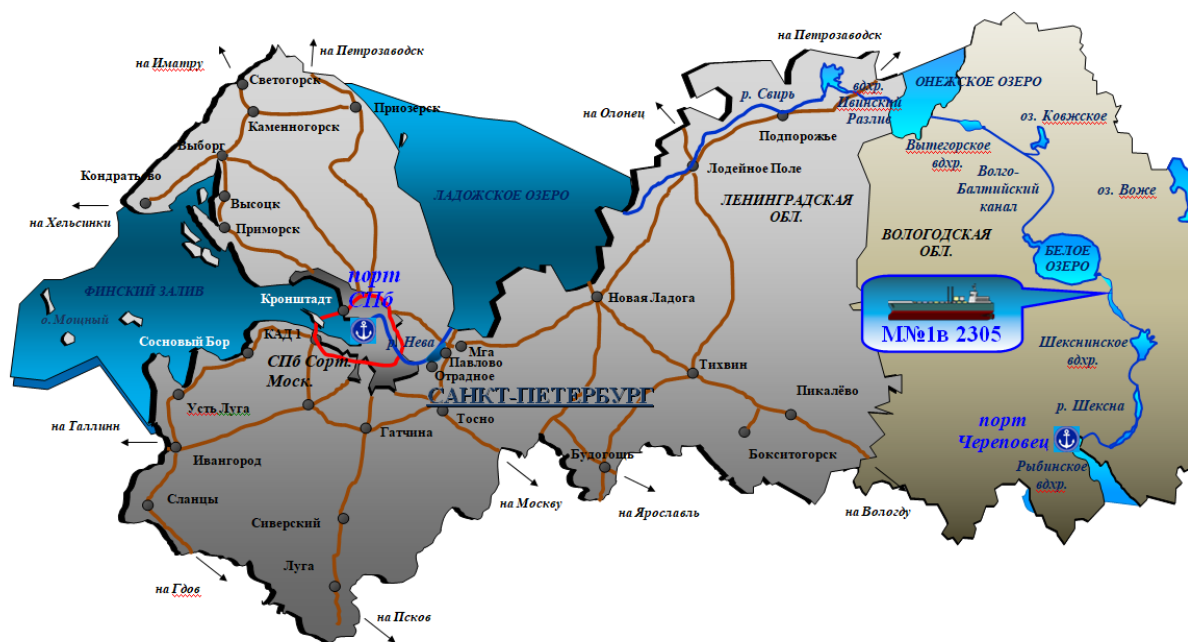


Рис. 3. Схема речной перевозки

Процесс приемки фарфоровых изделий осуществляется партиями. Под партией понимается количество одинаковых изделий по материалу, обрабатываемых одновременно при неизменном технологическом процессе и сопровождаемых документом, подтверждающим качество товаров.

Все изделия подвергаются внешнему осмотру, включая простукивание сухой чистой деревянной палочкой для обнаружения проблемных зон, а именно – трещин. Посуда, имеющая внешние дефекты, такие как деформированные края, шероховатость, царапины и трещины, списывается как бракованная.

Торговое предприятие по своему усмотрению может проводить итоговую проверку качества фарфоровых изделий. Данная процедура осуществляется путем отбора 1% (но не менее 10 штук) одинаковой продукции из разных мест партии по каждому размеру и сорту. Изделия должны соответствовать документам, которые подтверждают их качество, маркировку товара, комплектность приборов и сервиза.

Для определения внешнего брака продукции используют измерительные приборы и мерную посуду, которые определяют толщину черепка, диаметр, высоту и емкость соответственно.

Исходя из приведенных данных выше, партия груза составляет 768 ящика размером (580×500×480 мм) и, зная вес одного ящика 20 кг, общая масса ящиков составляет 15 360 кг.

Определение маршрута является важнейшим в планировании перевозок, так как от это-

го зависит скорость доставки, безопасность и стоимость перевозимого груза.

Различные варианты маршрутов показаны на рис. 1–3.

Технология размещения груза

Размещение груза на поддоне: фарфоровые сервизы упаковывают в ящики размером: 580×500×480 мм, предельной массой упакованной продукции равной 20 кг.

Для контейнерных перевозок согласно требованиям ISO следует использовать паллеты размером 1000×1200 мм.

Определение количества мест в одном слое груза.

Рассчитаем площадь паллета: $1000 \cdot 1200 = 1200000 \text{ (мм}^2\text{)}$, а также площадь ящика, уста-

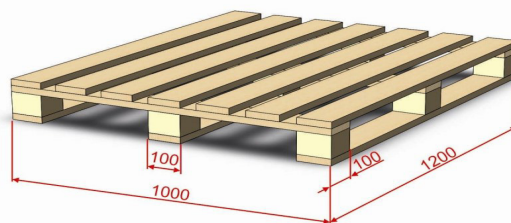


Рис. 4. Схема поддона

новленного на дно: $580 \cdot 500 = 290000 \text{ (мм}^2\text{)}$. С помощью деления площади паллета на площадь грузового места, выясняем количество грузовых мест в одном ярусе (n_p):

$$\frac{1200000}{290000} = 4 \text{ ящика.}$$

Максимальная высота пакета:

$$h_3 = \frac{Q_{\text{под}}}{n_p q_m} h_m + h_{\text{под}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{под}}$ – грузоподъемность поддона, т; n_p – количество мест в одном ярусе; q_m – масса одного грузового места, т/место; h_m – высота одного ряда (места), м/ряд; $h_{\text{под}}$ – высота поддона, м.

По формуле (1):

$$h_3 = \frac{2,5}{4 \cdot 0,02} \cdot 0,48 + 0,145 = 15,1 \text{ м.}$$

Масса пакета не должна превышать грузоподъемность погрузчика. Максимальная высота пакета при этом будет равна

$$h_4 = \frac{Q_{\text{под}} - q_{\text{под}}}{n_p q_m} h_m + h_{\text{под}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{погр}}$ – грузоподъемность погрузчика, т; $q_{\text{под}}$ – масса поддона, т.

По формуле (2):

$$h_3 = \frac{(3 - 0,02)}{4 \cdot 0,02} \cdot 0,48 + 0,145 = 18 \text{ м.}$$

С учетом рассмотренных ограничений, высота в первом приближении равна

$$h_n = \min\{1,2; 1,8; 9,05; 10,76\} \rightarrow h_n = 1,2 \text{ м.} \quad (3)$$

Количество рядов груза по высоте по формуле (3):

$$n_h = E \left\{ \frac{h_n - h_{\text{под}}}{h_m} \right\}, \quad (4)$$

где E – условное обозначение целой части числа в фигурных скобках.

По формуле (4):

$$n_h = \frac{1,2 - 0,145}{0,48} = 2,1 \rightarrow 2.$$

Высота пакета:

$$h_n = n_h h_m + h_{\text{под}} = 2 \cdot 0,480 + 0,145 = 1 \text{ м.} \quad (5)$$

Масса груза в пакете:

$$q_n = n_p n_h q_m = 4 \cdot 2 \cdot 0,020 = 0,160 \text{ т.} \quad (6)$$

Масса сформированного пакета:

$$q_m = q_n + q_{\text{под}} = 0,160 + 0,02 = 0,180 \text{ т.} \quad (7)$$

Удельная нагрузка, создаваемая одним пакетом:

$$p_y = \frac{q_m}{l_n \cdot b_n \cdot k_{\text{ук}}}, \quad (8)$$

где $k_{\text{ук}} = 1,1$ – коэффициент укладки пакетов в штабель (зависит от размеров пакета

$$k_{\text{ук}} = 1,2 \text{ м}^2 : (0,3016 \text{ м}^2 \cdot 4);$$

01 Блочнo №1: ящиков=8, слоев=2, в слое=4.00, объем=84.36%

Параметры укладки

Вариант укладки:	Блочнo №1
Всего ящиков:	8 шт
Всего слоев:	2 шт
Ящиков в одном слое:	4.00 шт
Высота укладки:	960 мм
Заполнено % объема:	84.36%
Масса паллеты:	180.00 кг

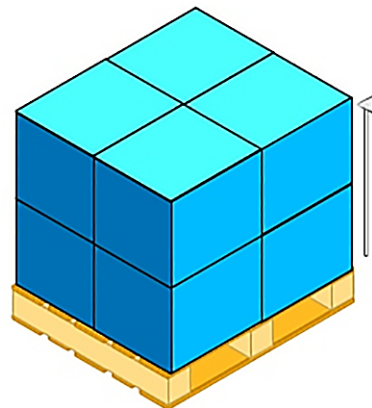


Рис. 5. Схема укладки ящиков на поддон [4]

$$p_y = \frac{0,18}{1,2 \cdot 1 \cdot 1} = 0,15 \text{ т/м}^2.$$

Зная габариты 40-футового контейнера «Palletwide» (12,045×2,44×2,372 м), можно рассчитать какое количество грузовых пакетов размером (1×1,2×1 м) сможет поместиться в данном контейнере.

Для того, чтобы определить количество грузовых пакетов, которые можно вместить в один контейнер, надо провести следующие расчеты:

Делим длину контейнера на длину сформированного пакета, ширину контейнера на ширину грузового пакета, высоту контейнера на высоту паллетированного груза. 12,045 : 1; 2,44 : 1,2; 2,372 : 1 соответственно.

В следствие чего получаем количество грузовых пакетов, которое можно разместить в контейнере: 12×2×2=48 грузовых пакетов.

Масса 48 грузовых пакетов = 48 · 180 кг = 8640 кг.

Так как перевозимый объем 96 грузовых пакетов, получается, что перевозимый вес двух контейнеров составляет 17 280 кг.

Зная максимальную грузоподъемность, можно сделать вывод, что вес загруженного контейнера полностью удовлетворяет максимальной загрузке контейнера.

Габариты вагона 11-280 составляют (15,724×2,764×2,86 м), следовательно, объем равен 124м³, значит 60 сформированных пакетов можно поместить в вагон [5].

Выберем транспортное средство для перевозки груза, которым можно перевезти наибольшее количество груза с наименьшими затратами.

Для определения оптимального маршрута сравниваются коммерческие показатели трех маршрутов, а это – протяженность маршрута, время доставки груза и стоимость перевозки.

Маршрут № 1. Груз начинает свое движение от железнодорожной станции Дрезден до железнодорожной станции Ростов. Доставка сервисов осуществляется в 40'PW на 2×4-осной фитинговых платформах для перевозки большегрузных контейнеров, модель 13-470, затем происходит перегрузка контейнеров с платформ на судно Контейнеровоз «ContainershipsVI» в порту Ростов [4]. Контейнеровоз движется от порта Ростов до порта Санкт-Петербург; затем от речного порта Санкт-Петербург – речного порта Самара;

Протяженность маршрута: 373+1304,58+2305 = 3982,58 км.

Время доставки:

$$23 + 54 + 85 = 162 \text{ ч} = 6 \text{ дней } 18 \text{ ч.}$$

Стоимость перевозки:

$$92\,609,6 + 290\,495,5 + 120\,184,12 = 503\,289,22 \text{ р. [6, 7].}$$

Маршрут № 2. На маршруте № 2, от железнодорожной станции Дрезден – до железнодорожной станции Самара, перевозка груза осуществляется в крытом вагоне, модель 11-280. Вес груза нетто – 13,824 т, брутто с 96 паллетами по 20 кг составляет 17,280 т. Отправка повагонная в 1 вагон.

Протяженность маршрута: 3008 км.

Время доставки: 6 суток 8,5 ч.

Стоимость перевозки: 282521,96 р. [6, 7].

Маршрут № 3. Перевозка начинается от аэропорта Дрезден до аэропорта Москва; Москва – грузополучатель в Самаре автомобильным транспортом [4].

Протяженность маршрута:

$$1643 + 1054 = 2643 \text{ км.}$$

Время доставки:

$$10,37 + 4 = 14,37 \text{ ч.}$$

Стоимость перевозки:

$$156144 + 5965560 = 6121704 \text{ р. [6–8].}$$

Определение наиболее оптимального варианта перевозки груза будет производиться по двум основным показателям.

1. Грузообороту – средней стоимости 1 т/км груза на маршрутах перевозки. Данный показатель – величина транспортной работы, в котором два показателя – количество тонн груза и расстояние. Но такая измерительная величина не показывает род перевозимого груза, поэтому он не может дать достоверную оценку.

2. В этом показателе происходит сравнение отношения суммарная стоимость перевозки на n маршруте (E_n) к стоимости перевезенного груза (C), Общий вес всей отправки составляет: *Вес груза нетто* – 13,824 т, брутто с 96 паллетами по 20 кг составляет 17,280 т.

Стоимость одного фарфорового сервиса составляет 25 000 р. (316\$). Общая стоимость отправки будет 19200000 р. (243 037\$).

1. Определим грузооборот по формуле:

$$Q_n = \frac{E_n}{ML_n}, \quad (9)$$

где E_n – суммарная стоимость перевозки на n маршруте, руб.; M – общий тоннаж перевезенного груза за всю поставку, т; L_n – суммарное расстояние на n маршруте, км.

Итак, по формуле (9) руб. / т · км:

Таблица 4

Сравнительные результаты использования маршрутов [6–8]

Маршрут	Вид транспорта	Количество подвижного состава, вид	Расстояние 1 ездки, км	Время 1 ездки, сут.	Стоимость, руб.	Руб./т км	Отношение стоимости перевозки к стоимости груза, %
№ 1 (ж.д.; море; река.)	№ 1а: Дрезден – Росток	платформа 13-470 2х4	3982,58	6,18	503289,22	0,009	2,6
	№ 1б: Росток – Санкт-Петербург	Контейнеровоз «ContainershipsVI»					
	№ 1в: Санкт-Петербург – Самара	Контейнеровоз «ContainershipsVI»					
№ 2 (ж.д.)	№ 2: Дрезден – Самара	Вагон 11-280	3008	6,20	282521,96	6,79	1,4
№ 3 (авиа; авто.)	№ 3: Дрезден – Москва	Ан-124	2643	0,143	6121704	167,5	30
	№ 3б: Москва – Санкт-Петербург	2 тягач Dayunсgs 4253 6х4, Полуприцеп-контейнеровоз K.SHG.S					

$$Q_1 = \frac{503289,22}{13,824 \cdot 3982,58} = 0,009;$$

$$Q_2 = \frac{282521,96}{13,824 \cdot 3008} = 6,79;$$

$$Q_3 = \frac{6121704}{13,824 \cdot 2643} = 167,5.$$

2. Показатели отношения стоимости перевозки к стоимости груза R_n :

$$R_n = \frac{E_n}{C}, \quad (10)$$

где E_n – суммарная стоимость перевозки на n маршруте, руб.; C – общая стоимость отправки, руб.

По формуле (10):

$$R_1 = \frac{503289,22}{19200000} = 0,026; \quad R_2 = \frac{282521,96}{19200000} = 0,014;$$

$$R_3 = \frac{6121704}{19200000} = 0,3.$$

Данные сравнительные показатели маршрутов приведены в табл. 4.

По данным табл. 4 можно сделать вывод, что оптимальным маршрутом перевозки фарфоровых сервизов из Дрездена в Самару, является второй маршрут, он дешевле в 2 раза первого маршрута по экономическим показателям и

в 22 раза по отношению к третьему маршруту, даже несмотря, на отставание по временным параметрам в сравнении с другими маршрутами, перевозка в крытом вагоне 11-280 остается оптимальным маршрутом из предложенных.

В данной статье произведено описание транспортных характеристик груза, выбор его тары и упаковки представленного груза, а также был определен перевозимый объем партии товара. Определен способ перевозки партии фарфоровых сервизов различными видами транспорта. Раскрыта технология выполнения погрузочно-разгрузочных работ при осуществлении перевозок, технология пакетирования груза укрупненными грузовыми единицами. Также были подробно рассмотрены 3 маршрута перевозки из Дрездена в Самару на различных видах транспорта. Произведен расчет стоимости и сроков перевозки груза для морского, речного, автомобильного, авиационного, железнодорожного транспорта на различных маршрутах. Проанализировав полученные расчетом данные, был определен оптимальный маршрут для перевозки фарфорового сервиза из Дрездена в Самару.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 54575-2011, Посуда фарфоровая. Технические условия. 81.060.20; 97.040.60, 01.01.2013, посуда фарфоровая, правила приемки, технические условия, маркировка, методы контроля, транспор-

тирование, упаковка, хранение. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088766> (дата обращения: 29.11.2020).

2. ГОСТ 14192-96 Маркировка грузов. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006710> (дата обращения: 29.11.2020).

3. MarineTraffic. URL: <https://www.marinetraffic.com/> (дата обращения: 29.11.2020).

4. Searates. URL: <https://www.searates.com/ru/services/distances-time/> (дата обращения: 29.11.2020).

5. Вагон.by. Сайт о вагонном парке и вагонном хозяйстве. URL: https://yandex.ru/search/?text=vagon.by&lr=98546&clid=1882628&src=suggest_B (дата обращения: 29.11.2020).

6. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами (Тарифное руководство № 1) / с изм. на 31 янв. 2017 г. Ч. 1; 2. М.: Красный Пролетарий, 2003.

7. Единый транзитный тариф. ЕТТ., Комитет ОСЖД, г. Варшава. 1991 (с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 января 2019 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902123714> (дата обращения: 29.11.2020).

8. Федеральный закон от 08.11.2007 г. № 259-ФЗ (ред. от 18.03.2020 г.) «Устав автомобильного транспорта и городского наземного электрического транспорта». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_72388/ (дата обращения: 29.11.2020).

УДК 656.135.2

К. В. Щекина*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫВОЗА ОТХОДОВ

*Рассматриваются вопросы управления отходами, а также выбор схемы вывоза.***Ключевые слова:** твердые бытовые отходы, сортировочная площадка, транспортное средство.**K. V. Shchekina***

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ORGANIZATION OF GARBAGE COLLECTION

*Waste management issues are considered, as well as the choice of an export scheme***Keywords:** municipal solid waste, sorting area, vehicle.

Одним из витков экологической проблемы стал вопрос утилизации мусора. Проблема управления отходами началась с развития технологий, когда появилось большое число заводов и фабрик, затем с появлением производства пластмассы, которая не разлагается несколько столетий. Система переработки отходов требует инвестирования больших денежных средств и постоянных усовершенствований. В среднем житель города может производить до 500 кг отходов.

Основной проблемой является нахождение новых способов переработки промышленных и опасных отходов. Для оптимальной переработки твердых бытовых отходов существенным фактором является его сортировка, которая позволяет уменьшить количество мусора путем извлечения вторсырья (бумага, картон, стеклотбой, пластик, пленка и т. д.). В нашей стране сжиганию подвергается пока лишь около 2% бытового мусора [1].

Твердые бытовые отходы состоят из бытовых отходов, строительного мусора и отходов с улиц. Этот мусор образуется в основном из жилых и коммерческих комплексов. С ростом урбанизации и изменений в образе жизни и привычках питания количество твердых бытовых отходов быстро увеличивается, а его состав меняется. За последние несколько лет потребительский рынок быстро вырос, что привело к упаковке продуктов в банки, алюминиевую фольгу, пластмассы и другие не биоразлагаемые предметы, которые наносят неисчислимый вред окружающей среде.

Все отходы, независимо от их вида, должны быть обработаны и пройти сортировку.

ТБО представляет из себя смесь из разнообразных материалов и перегнивающих продуктов, которые отличаются как по физическим, механическим и химическим свойствам, так и по размерам.

Управление твердыми отходами определяется как дисциплина, связанная с контролем за образованием, хранением, сбором, транспортировкой или передачей, переработкой и удалением материалов с твердыми отходами так, чтобы наилучшим образом охватить широкий спектр вопросов здравоохранения, охраны окружающей среды, экономики, эстетики, техники и др.

Технические аспекты комплексного управления твердыми отходами включают в себя следующие виды деятельности:

- обработка и хранение отходов у источника;
- уменьшение отходов;
- разделение отходов;
- эффективная система сбора отходов;
- переработка отходов;
- первичный и вторичный транспорт;
- производство и маркетинг переработанного продукта;
- обработка отходов;
- санитарная свалка;
- управление опасными отходами;
- специальные отходы (строительный мусор, крупногабаритные отходы и т. д.);
- восстановление загрязненных участков.

Управленческие аспекты включают в себя следующие виды деятельности:

- разработка и реализация политики;
- стратегическое и оперативное планирование;
- мобилизация сообщества;
- мониторинг и оценка;
- организационное развитие;
- управление персоналом и наращивание потенциала;
- снижение затрат и получение доходов;
- управление информацией и коммуникацией.

Основная цель обращения с твердыми отходами заключается в уменьшении и устранении неблагоприятных воздействий отходов как на окружающую среду, так и на здоровье человека для поддержки экономического развития и повышения качества жизни.

По оценкам Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, около 60 млн т твердых бытовых отходов образуется каждый год. В последние годы объем ТБО в России неуклонно растет. Более 90% отходов в России свозятся на свалки для их захоронения.

Объем отходов как таковой не является проблемой; вместо этого проблема возникает из-за способности или неспособности правительств, частных лиц и фирм по утилизации отходов справляться с задачей управления отходами и защиты окружающей среды. Сейчас около 90% отходов вывозятся на свалки.

Есть две системы вывоза одноэтапная-когда мусор вывозят с объекта сразу на свалку, и двухэтапный, который подразумевает наличие площадки для накопления и сортировки мусора перед вывозом на свалку.

На первом этапе мусор вывозится с объектов и привозится на мусорную площадку. На площадке, в зависимости от вида отходов (строительные, пищевые отходы, с большим содержанием картона или пластика), контейнер опустошается либо на площадке для сортировки мусора, либо сразу в приемник для его прессовки и перевалки из малых контейнеров в контейнера большего объема. На втором этапе мусор вывозится на полигоны для захоронения отходов или на перерабатывающие заводы [2].

Выбор маршрута перевозки зависит от вида транспорта и от объема контейнеров. На транспорте применяются следующие системы:

1) мультилифт – это крюковая или тросовая система, оснащенная гидравлическим грузоподъемным механизмом. Механизм блокировки в системе грузозахватного устройства надежно удерживает контейнер на месте;

2) система лифтдампер – способна снимать/поднимать контейнер с шасси для его погрузки или разгрузки;

3) мусоровоз – предназначен для загрузки, уплотнения и разгрузки мусора. Бывают мусоровозы с задней и боковой загрузкой и грейферные.

В основном применяется два вида маршрута движения. Это кольцевой – где схема проезда транспорта представляет собой замкнутую линию, соединяющую собой несколько пунктов забора мусора, а точка начала маршрута и точка конца маршрута является одной и той же.

И маятниковый маршрут движения – с обратным холостым пробегом, с груженым пробегом в обоих направлениях.

При организации схемы вывоза твердых отходов необходимо рассматривать возможность сортировки и прессовки мусора на сортировочной площадке, что может увеличить расстояние от объекта до пункта выгрузки мусора, но при этом позволит снизить нагрузки на полигоны. Выбор оптимального маршрута движения является одним из определяющих факторов эффективности использования подвижного состава: скорость сбора, показатели использования топлива, его производительность.

Библиографический список

1. Горбунов В. А., Лысенко А. А. Переработка ТБО на месте их образования // ЖКХ. 2004. № 10. Ч. 1. С. 60.
2. Алимов А. Использование возможностей логистики в модернизации работы с отходами производства (логистика отходов) // РИСК: ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2009. № 1.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 623.822.7

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-169-174

С. Г. Бурлуцкий*

кандидат технических наук, доцент

В. И. Василянский**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

А. С. Голосий*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

** АО «КБ „Арсенал“ им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛЕТНОЙ ПАЛУБЫ КОРАБЛЯ АВИАНОСНОГО ТИПА

Степень пригодности авианосца к ведению боевых действий определяется не только количественным составом авиагруппы и водоизмещением корабля, но и показателями его взлетно-посадочного комплекса. В работе предпринята попытка его количественной оценки с помощью коэффициента пропускной способности полетной палубы.

Ключевые слова: авианесущий корабль, летательный аппарат корабельный, авиационно-технические средства корабля, полетная палуба, аэрофинишер, катапульты, стартовая позиция.

S. G. Burlutsky*

PhD, Tech., Associate Professor

V. I. Vasilyansky **

PhD, Tech., Senior Research Employee

A. S. Golosii *

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

** JSC KB «Arsenal», St. Petersburg

METHODICAL APPROACH TO DETERMINING THE FLIGHT DECK CAPACITY OF AN AIRCRAFT CARRIER TYPE SHIP

The degree of suitability of an aircraft carrier for combat operations is determined not only by the quantitative composition of the air group and the ship's displacement, but also by the indicators of its take-off and landing complex. In this work, an attempt is made to quantify it using the coefficient of the flight deck capacity.

Keywords: aircraft carrier, ship aircraft, aviation technical ship equipment, flight deck, arresting gear, launch system, launch position.

Наиболее сложным в практической деятельности и важным с точки зрения функциональной эффективности авиационного вооружения авианесущего корабля (АНК), является процесс организации и обеспечения групповых полетов с корабля.

Это обусловлено специфической, конструктивной особенностью кораблей авианосного типа и, в первую очередь, ограниченностью пропускной способности полетной палубы, которая определяет максимальный состав тактической группы ($N_{гр\max}$), задействуемой с корабля (в одном групповом вылете). Указанный показатель

и его численное значение служат критерием эффективности одной из основных подсистем авиационного вооружения корабля (АВК) – комплекса авиационно-технических средств корабля (АТСК). Комплекс АТСК, в общем виде, характеризует степень приспособленности АВК, к решению стоящих перед кораблем задач [1].

Архитектурный облик современного корабля авианосного типа с классической компоновкой полетной палубы (ПП) в настоящее время можно считать сложившимся. Типичными из зарубежных авианосцев являются корабли типа «Нимитц» [2] (рис. 1), а из отечественных –



Рис. 1. Полетная палуба авианосца CVN-68 «Нимиц»:
1 – стартовая позиция; 2 – техническая позиция ЛАК; 3 – посадочная полоса;
4 – линия безопасности; 5 – парковочная зона; 6 – катапульта

проект атомного тяжелого авианесущего крейсера (АТАКР) «Ульяновск» (рис. 2).

Характерные конструктивные особенности кораблей: сплошная, протяженная по всей длине корабля верхняя (она же полетная) палуба, с угловой посадочной полосой, включающей аэрофинишный блок с 3–4 приемными тросами, а также взлетный участок со стартовыми

позициями у основания трамплина, или у катапульт. Посадочная полоса с обеих сторон ограничена линиями безопасности, слева и справа от которых располагаются зоны размещения мест стоянки (технических позиций (ТП) подготовки) ЛАК. Принципиальные различия в компоновке палуб определяются, в основном, составом и особенностями размещения взлетных



Рис. 2. Архитектурный облик и компоновка ПП АТАКР «Ульяновск» [3]:
1 – трамплин; 2 – стартовая позиция; 3 – техническая позиция ЛАК; 4 – посадочная полоса;
5 – аэрофинишер; 6 – линия безопасности; 7 – парковочная зона ПП

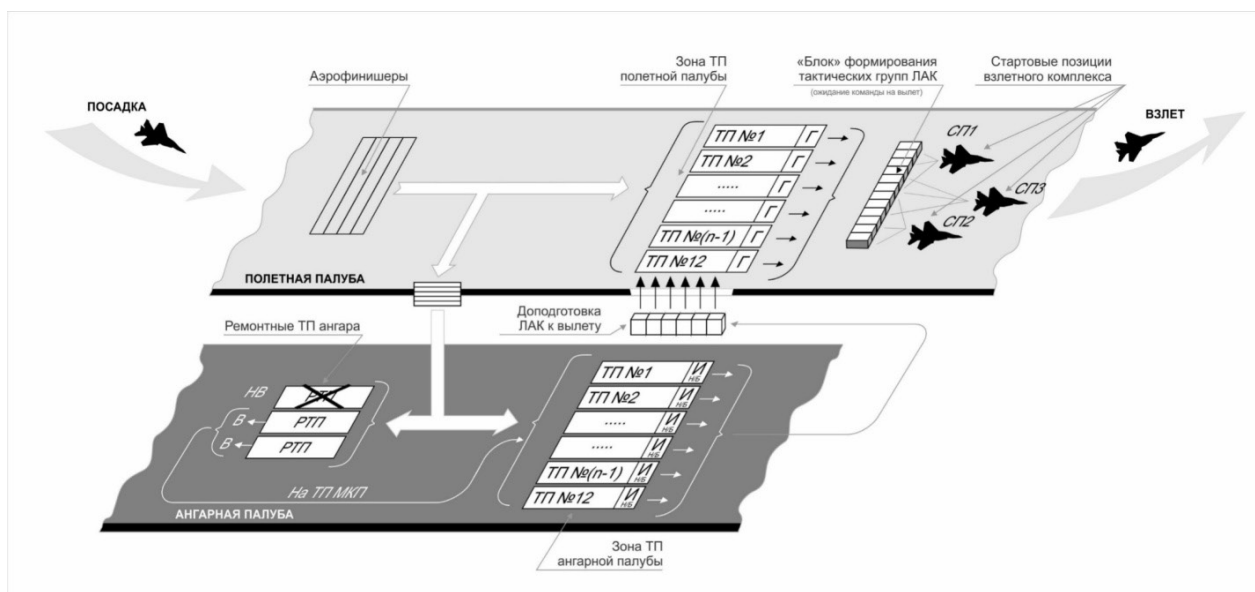


Рис. 3. Схема функционирования устройства и оборудования полетной и ангарной палуб как элементов СМО

комплексов (катапультного на первом корабле и трамплинного – на втором проекте).

С точки зрения системотехники, полетную и ангарную палубы, а также их основные устройства (взлетные, посадочные, парковую зону, стартовые и технические позиции) можно рассматривать как систему массового обслуживания. Тогда схему их функционирования можно представить в следующем виде (рис. 3).

На вход системы (аэрофинишер) поступают заявки на обслуживание – обеспечивается посадка самолетов на корабль. Совершив посадку, самолеты размещаются (выруливают или транспортируются) на ТП полетной палубы, здесь производится подготовка их к вылету, или, например, неисправные и получившие боевые повреждения ЛАК отправляются в ангар. В ангар отправляются также и исправные ЛАК, выполнившие 5 вылетов, для более глубокого контроля их технического состояния

Подготовленные на ПП самолеты направляются на стартовые позиции (СП) и в соответствии с заданием, в последовательности, определенной плановой таблицей полетов (ПТП), взлетают с корабля. После завершения полета ЛАК возвращаются на корабль, производят посадку и цикл повторяется определенное ПТП количество раз.

ЛАК, которые были направлены в ангар, размещаются:

- исправные, выполнившие 5 вылетов, на ТП ангарной палубы, где производится их межполетная комплексная подготовка (МКП) к вылету;

- ЛАК, имеющие боевые повреждения и отказы, которые по трудоемкости устранения существенно превышают продолжительность оперативных видов подготовки, направляются на ремонтные ТП ангарной палубы. Отремонтированные ЛАК перемещаются на ТП ангарной палубы для проведения на них МКП.

На отечественных АНК запрещается производить в ангаре заправку ЛАК авиационным топливом и обеспечивать подвеску на них авиационных боеприпасов. Вследствие этого ЛАК после проведения ангарной подготовки (МКП) необходимо поднять и установить на ТП верхней (полетной) палубы для завершения их подготовки к вылету.

В целом рассмотренная выше система, как система массового обслуживания (СМО), имеет один входной канал (блок аэрофинишеров), несколько каналов для технического обслуживания ЛАК (в нашем случае – по числу ТП), а также 3–4 канала на выход из системы (по числу стартовых позиций).

ЛАК, как объекты обслуживания, могут находиться в следующих состояниях: «исправный и боеготовый»; «исправный, но не боеготовый»; «неисправный, но может быть восстановлен»; «неисправный и восстановлен быть не может» – безвозвратные потери.

ЛАК в СМО могут находиться в состояниях: в ожидании обслуживания, в процессе обслуживания (на подготовке к вылету, в ремонте), на формировании наряда (группы) – ожидание команды на вылет.

Вне корабля ЛАК могут находиться в состоянии «в воздухе» (в полете). Здесь необходимо выделить следующие особые состояния: взлет одиночного ЛАК; взлет группы ЛАК с корабля, включая ее сбор, полет в зону применения, возвращение на корабль (ропуск группы), посадка на аэрофинишер.

По топологии размещения в составе сил и средств ЛАК могут находиться: на ТП ПП и ангара, на стартовых позициях, на самолетоподъемнике, на аэрофинишере, на местах временной стоянки после посадки, в процессе руления по палубе на стартовые и ТП, транспортироваться тягачом или ангарной системой транспортировки и. т. п.

Известно, что математическая модель реального процесса функционирования ЛАК в системе базирования на АНК есть некоторый математический объект, поставленный в соответствие рассматриваемому физическому процессу [4]. При этом под математической моделью условимся понимать совокупность соотношений, связанных характеристиками состояний процесса с параметрами системы, исходной информацией и начальными условиями. В нашем случае это совокупность соотношений (состояний ЛАК), связанных с характеристиками процесса обеспечения базирования многоцелевой АГ на корабле авианосного типа, параметрами системы базирования (комплексом АТСК), исходной информацией и начальными условиями (состав АГ и ПТП).

Наиболее адекватными для описания рассматриваемой системы обеспечения базирования ЛАК на АНК являются математические схемы систем массового обслуживания. В данном случае ЛАК выступает как объект обслуживания, поступающий на обслуживание в систему базирования – комплекс АТСК. В свою очередь, система базирования ЛАК может быть интерпретирована как многоканальная система массового обслуживания с ожиданием и приоритетом в обслуживании, т. е. поступившая заявка на обслуживание (например, подготовку к вылету) в порядке очереди ожидает возможности быть обслуженной. Вместе с тем, если в очереди на обслуживание есть объекты с приоритетом в обслуживании (например, ЛАК боевого обеспечения), то они обслуживаются вне очереди, удлиняя тем самым время ожидания на обслуживание предыдущей заявки.

Каждое мгновение состояние системы будет описываться набором чисел: $z_1, z_2, \dots, z_{n-1}, z_n$, которые должны достаточно полно отображать основные свойства системы в данный момент. Очевидно, что в общем случае значения z_i зависят от времени и могут быть выражены как функции времени: $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$.

Эти величины в дальнейшем будем считать характеристиками состояний процесса. Значения z_1, z_2, \dots, z_n можно интерпретировать как координаты точки в n -мерном пространстве. Тогда, если рассматривать фазовую координату $z_i(t)$ как функцию времени (t), нетрудно представить фазовую траекторию как вектор-функцию $z(t)$ с составляющими по осям координат: $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$.

Изложенная ситуация характерна для системы, строго придерживающейся определенной очередности (последовательности) в обслуживании, но в реальной практике, ожидающая обслуживания заявка может найти свободные каналы (в системе обеспечения) для обслуживания (в соответствии с технологической картой подготовки ЛАК, например, к вылету) и тем самым сократить время ожидания в очереди.

Заявки, поступающие на обслуживание в систему, являются постоянными, образуют поток, последовательность событий, специальным образом ($0 \leq t \leq \infty$), расположенных во времени (t). С точки зрения системы обеспечения базирования, все заявки потока на обслуживание ЛАК в основном следует принять равноправными, следовательно, поток можно считать стационарным потоком однородных событий. Так как интервал времени между очередными заявками не зависит от продолжительности интервала, то такой поток, кроме того, считается потоком без последствия. Следовательно, поток заявок на обслуживание ЛАК в системе обеспечения базирования может быть принят простейшим, или пуассоновским.

В этом случае функция плотности $f(z)$ случайной величины ζ_j при $j \geq 0$ для потока имеет вид показательного закона распределения с параметром λ :

$$f(z) = \lambda e^{-\lambda z}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность потока заявок на обслуживание ЛАК.

Дисциплина очереди на обслуживание ЛАК в системе обеспечения базирования должна быть принята следующей:

- первую линию (канал) занимает заявка, которая раньше других поступила в систему;
- второй канал занимает заявка, для которой оставшееся время обслуживания (пребывания в системе) наименьшее;
- все заявки на обслуживание принимают в соответствии с плановой таблицей полетов, которая задается соответствующими законами распределения близкими к пуассоновскому потоку, правда, возможны случаи, когда потоки принимаются детерминированными (имеют фиксированные значения).

Таблица 1

Численные (максимальные) значения пропускной способности ПП для ряда возможных компоновок ПП с соответствующим составом средств

$\lambda_{\Pi} \backslash \lambda_{вз}$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
0,75	0,423	0,545	0,60	0,631	0,652
1,00	0,500	0,655	0,75	0,800	0,833
1,25	0,553	0,769	0,882	0,952	1,000
1,50	0,100	0,852	1,00	1,090	1,154

Для того, чтобы выполнить анализ такой системы методом математического моделирования необходимо, в первую очередь, выбирать специальные показатели, характеризующие качество функционирования системы. В качестве такого показателя (критерия эффективности) принят максимальный состав тактической группы ($N_{гр_{max}}$), задействуемой с корабля (в одном групповом вылете). Известно также, что максимальный состав тактической группы самолетов, задействуемых с корабля, в директивно заданное время, и темп взлета с корабля, включая ее посадку (на корабль), также являются основными показателями боевой эффективности АНК в целом.

В частности, применительно к ТАКР «Адмирал Кузнецов», $N_{гр_{max}}$ определяется, в основном, количеством ТП, расположенных в парковой зоне ПП. Дальнейшее увеличение состава тактической группы (ТГ) ЛАК, задействуемых с корабля в одном групповом вылете, возможно только за счет своевременной подачи на СП небоеготовых ЛАК из ангара, или из других мест, например, с мест временной стоянки ЛАК на ПП (в носовой оконечности корабля). То есть необходимо обеспечить сбалансированную производительность обеспечивающих подсистем, таких как системы транспортировки ЛАК на ПП и в ангаре, учесть особенности размещения и оснащения СП, определить порядок и последовательность за руливания на них подготовленных к вылету ЛАК. Кроме того, необходимо в полном объеме исследовать процесс функционирования авиационно-технических средств, обеспечивающих подготовку к вылету разнотипных ЛАК в кратчайший срок.

Решение подобных задач под силу математической модели, реализуемой методом статистических испытаний, который позволяет не только вычислить приведенные выше показатели, но и исследовать тенденции в их поведении в зависимости от изменения начальных или каких-либо других условий.

Тем не менее для получения численного значения $N_{гр_{max}}$ для различных компоновок ПП кораблей авианосного типа можно воспользоваться и аналитическими зависимостями, дающими вполне приемлемый для практики результат. Так, пропускная способность ПП ($\mu_{ПП}$) может быть представлена в виде:

$$\mu_{ПП} = \lambda_{вз} / (1 + \lambda_{вз} / \lambda_{\Pi}), \text{ самолетов / мин; } \quad (2)$$

где $\lambda_{вз}$ – интенсивность взлетного комплекса; λ_{Π} – интенсивность посадки на аэрофинишер.

Зависимость максимального значения $\mu_{ПП}$ от величины $\lambda_{вз}$ и λ_{Π} приведена в табл. 1.

Указанные значения пропускной способности $\mu_{ПП}$ справедливы (постоянны), только при использовании боеготовых самолетов, размещенных на стоянках ПП. Для самолетов, подаваемых из ангара, $\mu_{ПП}$ будет также зависеть от времени, затрачиваемого на подъем самолетов из ангара и завершение их предполетной подготовки.

В этом случае максимальный состав ТГ самолетов, задействуемых с корабля в одном групповом вылете будет равен:

$$N_{гр_{max}} = N_{МС_{ПП}} \cdot \mu_{ПП}^{max}, \quad (3)$$

где $\mu_{ПП}^{max}$ – пропускная способность ПП максимальная, самолетов/мин; $N_{МС_{ПП}}$ – количество мест стоянки ЛАК на ПП; а темп выпуска самолетов с корабля (F) определен следующим соотношением:

$$F = t_{вз} \frac{N_{гр_{max}}}{n_{сп}}, \quad (4)$$

где $t_{вз}$ – сумма времен, затрачиваемых одиноким самолетом на установку на стартовое устройство стартовой позиции и стыковку с ним, вывод двигателей на взлетный режим, разбег по ПП, возврат стартового устройства в исходное положение; $n_{сп}$ – количество стартовых устройств на корабле.

Графическая интерпретация приведенных выше зависимостей в функции темпа взлета $N_{гр_{max}}$ с кораблей, оборудованных различным по составу взлетно-посадочным комплексом, показана на рис. 4. На циклограммах арабскими цифрами обозначены порядковые номера взлетающих самолетов (последний – больший по значению соответствует составу $N_{гр_{max}}$). Из приведенных данных следует, что максимальная по составу ТГ самолетов, которая может быть задействована с корабля, определяется в первую очередь количеством стояночных мест самолетов на ПП и составом взлетного комплекса (количеством стартовых позиций) и несущественно зависит от его типа разгонного устройства. Это видно из сравнительного анализа компоновок ПП проекта 1143.5 (первая) и АНК типа «Нимитц» – последняя.

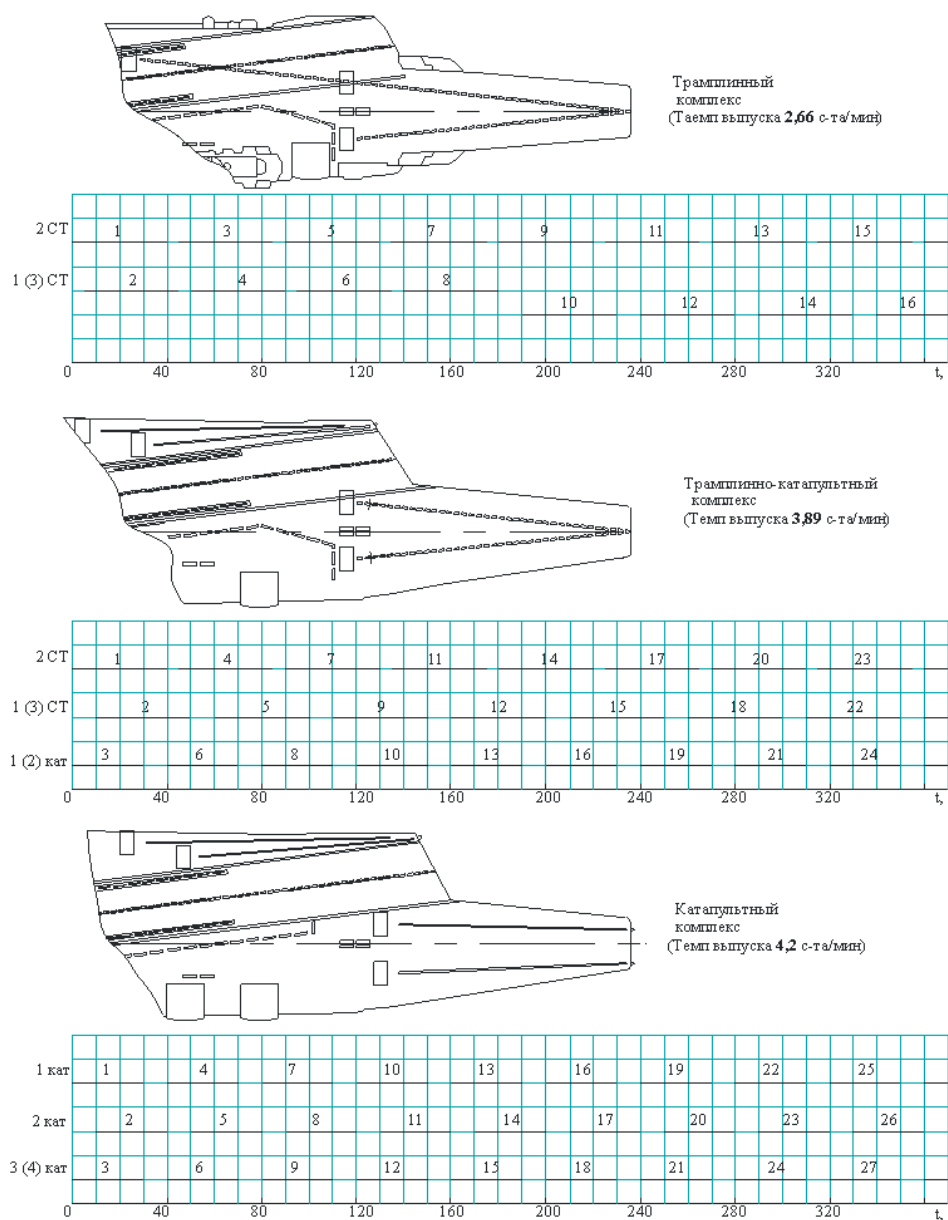


Рис. 4. Зависимость темпа выпуска самолетов с корабля (F) от типа и состава взлетно-посадочного комплекса

В целом изложенный методологический подход позволяет на различной стадии создания (проектирования) АНК с достаточной степенью точности спрогнозировать (определить) значения максимальных потенциальных возможностей его авиагруппы по решению основных задач при наличии ограниченного количества исходной информации [5].

Библиографический список

1. Альховиков В. М. и др. *Авиация ВМФ России и научно-технический прогресс: концепции создания, пути развития, методология исследований* / под ред. Е. А. Федосова. М.: Гос. науч.-исслед. ин-т авиац. систем, 2005.
2. *Авианосцы типа «Нимиц»*. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 02.12.2020).
3. В России захотели воскресить советский атомный авианосец «Ульяновск». URL.: <https://lenta.ru/news/2020/01/14/ulyanovsk/> (дата обращения: 02.12.2020).
4. Бусленко Н. П. *Метод статистического моделирования*. М., 1970. 113 с.
5. Солнышков Ю. С. *Оптимизация выбора вооружения*. М, 1968. 103 с.

УДК 623.822.7

С. Г. Бурлуцкий*

кандидат технических наук, доцент

В. И. Василянский**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

А. С. Голосий*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

** АО «КБ „Арсенал“ им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВИАНЕСУЩИХ КОРАБЛЕЙ

Представлен краткий аналитический обзор по материалам отечественной и зарубежной печати. Усовершенствования, новые технические решения и технологии в проекте перспективного авианосца ВМС США охватывают широкий круг вопросов – от внедрения отдельных принципиально новых технических устройств до изменения общей компоновки корабля.

Ключевые слова: авианосец, летательный аппарат, авиационно-технические средства корабля, электромагнитная катапульта, аэрофинишер.

S. G. Burlutsky*

PhD, Tech., Associate Professor

V. I. Vasilyansky**

PhD, Tech., Senior Research Employee

A. S. Golosii*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

** JSC KB Arsenal, St. Petersburg

THE MAIN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF AVIATION TECHNICAL MEANS OF AIRCRAFT-CARRYING SHIPS

A brief analytical review based on materials from domestic and foreign press is presented. Improvements, new technical solutions and technologies in the project of a promising aircraft carrier of the US Navy cover a wide range of issues – from the introduction of certain fundamentally new technical devices to changing the general layout of the ship.

Keywords: aircraft carrier, aircraft, aircraft technical means of the ship, electromagnetic aircraft launch system, electromagnetic catapult, arresting gear.

Первый авианосец нового поколения «Джеральд Форд» официально приняли в состав ВМС США в 2017 г., однако судостроительная верфь и предприятия-поставщики оборудования до сих пор заняты исправлением недостатков, выявленных в ходе испытаний корабля. В декабре 2019 г. спустили на воду второй авианосец «Джон Ф. Кеннеди».

Проект авианосца «Джеральд Форд» подразумевает внедрение около 13 новых критически важных конструкторских решений [1]. Два из них приходится на комбинированную РЛС Dual Band Radar (DBR), включающую многофункциональную РЛС с активными фазированными антенными решетками Х-диапазона AN/SPY-3 MFR производства корпорации Raytheon и РЛС обнаружения воздушных целей с АФАР

S-диапазона AN/SPY-4 VSR производства корпорации Lockheed Martin.

Другими новшествами являются электромагнитная катапульта EMALS (Electromagnetic Aircraft Launch System) и новые аэрофинишеры AAG (Advanced Arresting Gear).

Следующие важные технологии включают ядерную энергетическую установку (ЯЭУ) с двумя реакторами A1B производства Bechtel Marine Propulsion Corporation. Выработка электроэнергии увеличится в 3,5 раза по сравнению с ЯЭУ авианосцев типа Nimitz (с двумя реакторами A4W), что позволит заменить гидравлические системы электрическими и устанавливать такие системы, как EMALS, AAG, и перспективные системы вооружения высокой энергии направленного действия.

Электроэнергетическая система Gerald R. Ford отличается от своих аналогов на кораблях типа Nimitz компактностью, меньшими трудозатратами в эксплуатации, что ведет к снижению численности экипажа и стоимости полного жизненного цикла корабля.

К другим критически важным технологиям Gerald R. Ford относятся следующие:

- лифты для перевозки авиационных боеприпасов AWE; на корабле планируется устанавливать 11 лифтов вместо 9 на авианосцах типа Nimitz;

- использование линейных электродвигателей вместо кабелей, что позволит увеличить нагрузку с 5 до 11 т и повысить живучесть корабля благодаря установке горизонтальных ворот в оружейных погребах;

- совместимый с PLC MFR протокол управления ЗПК ESSMJWL;

- всепогодная система посадки с использованием спутниковой системы глобального позиционирования GPS JPALS;

- плазменно-дуговая печь для переработки отходов PAWDS;

- станция приема грузов на ходу HURRS;

- обратноосмотическая опреснительная установка (+25% мощности по сравнению с существующими системами);

- используемая в летной палубе корабля высокопрочная низколегированная сталь HSLA 115;

- используемая в переборках и палубах высокопрочная низколегированная сталь HSLA 65;

- применение тяжелого БЛА.

В дальнейшем отмечены три основных направления, оказывающие решающее влияние на развитие главного комплекса авианосца – взлетно-посадочного комплекса.

Электромагнитная катапульта EMALS

Предыдущий авианосец типа «Нимитц» оснащен паровыми катапультами C-13 мод. 2. Они способны запускать самолеты с корабля каждые 60с [2]. При одновременном использовании всех четырех катапульти может быть обеспечен темп выпуска около 20 с на самолет.

Опыт применения паровых катапульти измеряется 800 тысяч запусков самолетов. При этом имело место лишь 30 серьезных поломок. Несмотря на столь значимую надежность паровых катапульти нельзя не замечать и их недостатки:

- паровые катапульти ограничивают максимальную массу катапультируемого самолета приблизительно 31 700 кг;

- в течение цикла запуска самолета с паровой катапульти его планер испытывает чрез-



Рис. 1. Первый запуск палубного самолета с корабля с помощью электромагнитной катапульти EMALS

мерные нагрузки, снижающие усталостную прочность последнего, что требует значительного усиления конструкции планера;

- с паровых катапульти затруднен запуск легких типов самолетов;

- в целом паровые катапульти не приспособлены для запуска современных БЛА.

Последний недостаток играет очень существенную роль, поскольку имеет место повышение роли беспилотной авиации, особенно в решении ударных задач связанных с риском потери летного состава.

На смену паровой катапульти разработана электромагнитная катапульта EMALS. 28 июля 2017 г. новый американский авианосец «Джеральд Форд» впервые запустил палубный самолет с ее помощью (рис. 1), а спустя полтора часа полета принял этот же F/A-18F «Super Hornet» из состава 23-й испытательной эскадрильи на электромеханический аэрофинишер AAG [3].

Конструкция электромагнитной катапульти показана на рис. 2; 3.

В ЭМК используется линейный индукционный двигатель с поочередно отключаемыми и подключаемыми секциями (рис. 4).

В пусковом устройстве специальная тележка (челнок), к которой самолет цепляется передней стойкой шасси, движется между двумя направляющими с электромагнитами. Электромагнитные секции после прохождения мимо них тележки отключаются, а те, к которым она приближается, включаются.

На запуск одного самолета при помощи электромагнитной катапульти необходимо в среднем 100 МДж энергии [4]. Энергетика паровой катапульти, установленной на авианосце типа

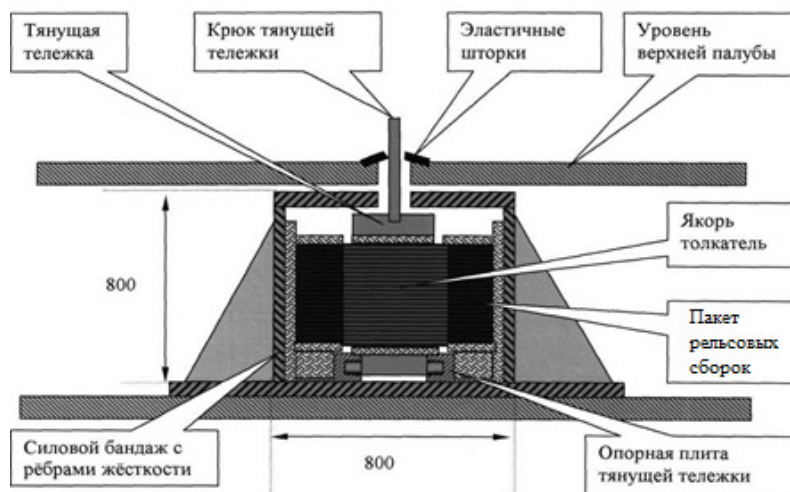


Рис. 2. Общий вид электромагнитной катапульты

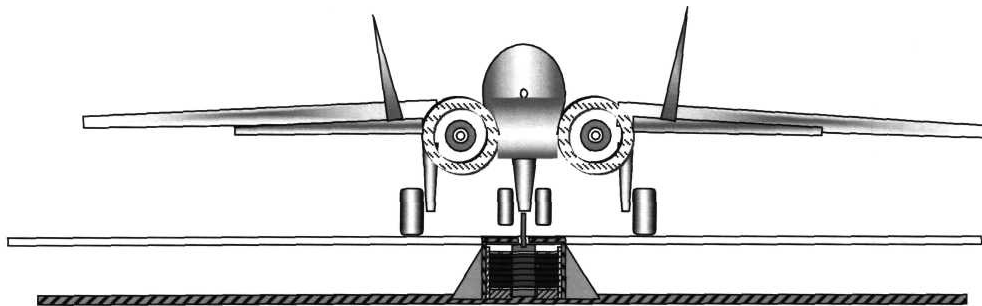


Рис. 3. Схема стыковки самолета с ЭМК



Рис. 4. Структурные компоненты катапульты EMALS



Рис. 5. Система накопления и выдачи энергии электромагнитной катапульты EMALS

«Нимиц», составляет 95 МДж. Максимальная энергия запуска для EMALS составляет 122 МДж. Поскольку такой объем энергии не может быть создан мгновенно, для ее хранения ис-

пользуется специальная генераторная установка (рис. 5).

Энергия накапливается и хранится в кинетическом виде, за счет вращения массивных

роторов генераторов. В подсистеме их четыре. Каждый ротор способен запасать до 100 МДж энергии, а их дозарядка (дораскрутка) после запуска занимает около 45 с. Каждый ротор связан с циклоконвертором, который при запуске EMALS обеспечивает преобразование кинетической энергии в электрическую для работы линейного индукционного двигателя.

За работу электромагнитной катапульты отвечает оператор, который способен регулировать энергию разгона тележки EMALS в зависимости от типа и массы запускаемого самолета. Кроме того, регулировка энергии разгона позволяет не перегружать силовую конструкцию самого самолета в момент старта.

В EMALS торможение тележки после запуска осуществляется не механически, как на паровой катапulte, а электромагнитными ловителями. На заключительном участке трека разгона длиной 6 м хода челнок ЭМК затормаживается электромагнитным полем без применения классических гидротормозов и возвращается на исходную стартовую позицию.

Длина действующего прототипа EMALS составляет 91 м. Пусковое устройство способно разогнать самолет массой 45 т до скорости в 240 км/ч.

К настоящему времени прототип американской электромагнитной катапульты произвел уже более ста запусков различных палубных самолетов. В их числе учебный самолет T-45C Goshawk, военно-транспортный C-2A Greyhound, истребитель F/A-18E Super Hornet, самолет дальнего радиолокационного обнаружения E-2D и перспективный истребитель F-35C Lightning II. Благодаря регулированию энергии запуска EMALS может быть использована для запуска и перспективных палубных беспилотников различных классов.

Несмотря на оптимистичные заявления о преимуществах ЭМК (низкие массогабаритные характеристики, высокий КПД, высокую надежность, малое время подготовки к работе, высокую степень автоматизации) остаются вне обсуждения вопросы, связанные с электромагнитной совместимостью ЭМК с бортовым радиоэлектронным оборудованием ЛАК и влиянием мощных электромагнитных полей на личный состав корабля. Кроме этого следует обратить также внимание на эксплуатационные особенности токоведущих устройств в условиях агрессивного воздействия факторов внешней среды.

Аэрофинишер нового поколения

В настоящее время американские авианосцы типа «Нимиц» оборудованы аэрофинишерами

Mk.4, Mk.7 Mod.3 и Mk.14. Это преимущественно тросовые полиспастно-гидравлические аэрофинишеры. Они имеют ограничения по массе самолетов и не могут принимать ни один современный или перспективный БЛА. Основным недостатком этого типа аэрофинишеров является достаточно жесткая тормозная характеристика. Тормозное усилие определяется положением кулачка, дросселирующего тормозную жидкость через клапан. В темпе торможения закон замедления остается неизменным, включая пиковые значения и порой колебания, что негативно сказывается на эксплуатационных характеристиках системы и на грузках на летчика. В зависимости от типа заходящего на посадку ЛАК, его посадочной скорости и текущей массы должно быть оперативно по заданной характеристике выбрано значение так называемой «уставки», которое и определяет положение дросселирующего кулачка на текущий режим работы тормозной машины.

Компания *General Atomics Electromagnetic Systems* разрабатывает аэрофинишер *Advanced Arresting Gear (AAG)* с 2010 г. В состав этого аэрофинишера нового поколения кроме уже известных устройств таких как тросовая система, гидротормоз, механический тормоз входит электродвигатель-генератор. Этот чувствительный элемент обладает низкой инерционностью и, в то же время, высоким крутящим моментом. Сигнал с последнего подается в цепь обратной связи системы (на кулачок), что позволяет сформировать закон управления с плавным регулированием замедляющей силы. В системе AAG также применены конденсаторы для накопления (рекуперации) энергии.

Работы по созданию новой системы аэрофинишеров ведутся управлением авиационных систем для BMC (Naval Air Systems Command). По заявлениям Defense Aerospace [5], во второй половине 2016 г. на полигоне объединенной базы «Макгвайр-Дикс-Лейкхерст» в Нью-Джерси проведен цикл испытаний AAG.

Испытания проводились в несколько этапов. На первом этапе аэрофинишер выполнил 1300 торможений «мертвых грузов» (тележек различной массы, снабженных реактивными двигателями; разгон осуществляется по железнодорожным путям). На втором – набегами палубного истребителя F/A-18E/F «Super Hornet». Самолет разгонялся по взлетно-посадочной полосе, а затем, не взлетая, тормозился аэрофинишером (рис. 6). В общей сложности AAG выполнил 200 таких торможений.

Следующим этапом испытаний было тестирование аэрофинишера AAG на максимальную нагрузку и перегрев [6]. В ходе испытаний



Рис. 6. Испытания аэрофинишера ААГ набегами истребителя F/A-18E/F «Super Hornet»

система в виде аварийной сети, состоящая из широких капроновых лент. При аварийной посадке самолет попадает в эту сеть и останавливается, получая незначительные повреждения или оставаясь целым.

Во время испытаний электромеханического аэрофинишера ААГ аварийной остановкой использовался самолет E-2C Hawkey, имеющий массу более 21 т. Hawkey набрал необходимую скорость, при которой обычно происходит посадка, и въехал в сеть, соединенную с ААГ. Система успешно остановила самолет (рис. 8).



Рис. 7. Посадка самолета F/A-18E на аэрофинишер ААГ

устройство обеспечило 22 торможения при посадке палубных самолетов подряд. В данном виде испытаний использовались пять палубных истребителей F/A-18E/F «Super Hornet» (рис. 7).

После зацепов самолеты сразу взлетали, а затем снова приземлялись. За 26 мин ААГ обеспечил 22 торможения, которые все были признаны полностью успешными. Испытания на предельную нагрузку (перегрев) позволяют определить способна ли система охлаждения тормозной машины выполнить несколько циклов торможения подряд и при этом не показать забросов температуры рабочего тела. После посадки задействованные 5 самолетов сразу взлетали, чтобы снова приземлиться, образуя, таким образом, непрерывный темп нагрузки.

В апреле 2019 г. разработчик ААГ объявил об успешных испытаниях системы при аварийной посадке самолета (в аварийный барьер). Согласно сообщению компании, это первые подобные испытания ААГ и первые за 20 с лишним лет испытания аварийной остановкой, проведенные в США.

В случае, когда самолет не может применить так для остановки, используется специальная



Рис. 8. Испытания функционирования аварийного барьера аэрофинишера ААГ при въезде в него самолета ДРЛО E-2C Hawkey

К настоящему времени в рамках испытания ААГ обеспечил уже более 5 тысяч посадок палубных самолетов на наземном аэродроме и 747 посадок на палубу авианосца «Джеральд Форд» [7].

На сегодняшний день ВМС закупили два комплекта ААГ: один установлен на G. Ford, а другой планируется на J. Kennedy.

Система хранения, подачи и подвески на самолет авиационного боезапаса

Системы хранения и транспортировки авиационного боезапаса на авианосцах вообще и на авианосцах ВМС США, в частности, являются их неотъемлемой частью. Эти системы встраиваются в общую компоновку корабля, удовлетворяя ряду зачастую противоречивых требований. Летательный аппарат, полетная палуба, система транспортировки, погреб авиационного оружия, сам боезапас – все эти компоненты должны быть увязаны в единый технологический цикл «выборки – подачи – подвески – (боевого применения) – снятия – транспортировки в погреб – укладки на место хранения». Применение ударных ЛА с авианосца предусматривает, в том числе использование ядерных боеприпасов.

Традиционно эта система включала внутреннее пространство корабля, элементы полетной палубы, систему транспортировки боезапаса из погребов на верхнюю палубу, систему подвески на ЛАК. Траектория движения оружия предусматривала несколько горизонтальных и вертикальных перемещений боезапаса на различных уровнях. Это приводило к значительным трудовым затратам времени на их выполнение. Расположение лифтов с выходом на полетную палубу всегда приводит к затруднению в проведении полетных операций. Таким образом, решение этой задачи – обращения авиационного оружия – это поиск компромиссного решения.

Совершенствование данной системы на проектах новых АВМА включает значительную перепланировку системы хранения и транспортировки авиационного боезапаса. Это достигается следующими мероприятиями:

- внедрение более прогрессивной системы складирования боеприпасов, что дает повышение коэффициента утилизации погреба по объему с 0,1 до 0,4;
- сведение количества горизонтальных перемещений во внутренних помещениях корабля до минимально возможного значения;
- использование моторизованных транспортировочных тележек АО;
- применение в конструкции лифтов линейных электродвигателей;
- расположение лифтов таким образом, чтобы они минимально препятствовали проведению полетов.

Такие мероприятия позволяют значительно сократить трудовые затраты на подготовку летательных аппаратов к полетам и увеличить ко-

личество самолетовылетов за директивно заданное время.

Снижению трудовых затрат при подготовке авиатехники к полетам (рис. 9) будет способствовать применение роботизированных систем подвески боезапаса на самолет и использование экзоскелетов (рис. 10).

Следует также отметить, что определенные успехи в создании робототехнических систем для подвески оружия имелись, по состоянию на 2009 г., на кафедре «Эксплуатации комплексов авиационного вооружения и робототехники» Военно-воздушной инженерной академии им. профессора Н. Е. Жуковского [8], до перемещения академии в ВУНЦ ВВС (г. Воронеж).

В теоретическом плане была сформулирована концепция робототехнической системы сна-



Рис. 9. Специалисты по вооружению подвешивают УР AIM-120 на истребитель F/A-18E Super Hornet



Рис. 10. Испытания экзоскелетов фирмы SuitX MAX

ряжения самолетов боеприпасами; определены принципы ее построения и технический облик.

В практическом плане реализации концепции велась разработка автоматизированного самоходного подъемно-транспортного устройства. В том числе разработан и испытан полноразмерный макет, оснащенный системой технического зрения и речевой системой управления.

Для этого серийно выпускаемую тележку СПГ-750 дооснастили приводом для движения и поворота (рис. 11). Произвели замену ложементов на платформе ориентации. До этого тележка могла передвигать боеприпас только вверх-вниз. Ее дополнили приводом перемещения грузов влево-вправо, вперед-назад и тем самым устранили главный недостаток – необходимость высокой точности при выставлении тележки. Кроме того, тележку оснастили компактными телевизионными камерами, которые позволяют контролировать и корректировать процесс подвески боеприпаса в ограниченных пространствах вне визуальной видимости.

Управление тележкой можно осуществлять джойстиком как по кабелю, так и с использованием радиоканалов. Разработана также голосовая система управления устройством. Перед началом работ специалисту группы вооружения необходимо идентифицировать свой голос по имеющейся базе данных в устройстве. После успешного прохождения этой процедуры специалист, используя стандартные команды, сможет управлять робототехнической системой, и она будет выполнять только его команды. В данном случае упрощается управление и обеспечивается дополнительный контроль по соблюдению мер безопасности, а также исключается выполнение работ неподготовленным специалистом. Система выполняет только стандартные команды, оговоренные документами, а все остальные звуковые сигналы воспринимает как шумовые помехи.



Рис. 11. Роботизированная тележка подвески авиационного оружия

Кафедра также вышла на уровень практического создания станции боевого снаряжения самолетов корабельной авиации. После возвращения самолета с боевого задания он должен закатываться на специальную площадку (позицию подвески оружия), на которой для каждой его точки подвески уже выставлены модернизированные подъемники с боеприпасами. Специалисту группы вооружения остается только проверить, подготовить узлы и дать команды автоматике. На завершающем этапе ему остается все проконтролировать и выполнить стыковку боеприпасов на узлах подвесок.

Правда, при кажущейся оперативности процедуры подвески, не берутся в расчет подготовительные операции подачи оружия из погребов на верхнюю палубу, снаряжение роботизированного подъемника оружием, включая его раскрепление, подача подъемника под самолет (в том числе швартовка и заземление).

Библиографический список

1. Ермаков А. С., Тебин П. Ю. Возможности и риски заокеанской программы строительства авианосцев нового поколения. URL: <http://nvo.ng.ru/authors/29033/> (дата обращения: 06.11.2020).
2. Шинкоренко Д. Планы строительства и модернизации авианосцев ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2012. № 9. С. 73–81.
3. Сычёв В. Электромагнитная катапульта впервые запустила самолет на море. 01.08.2017. URL: <https://nplus1-ru.turbopages.org/nplus1.ru/s/news/2017/08/01/emals/> (дата обращения: 06.11.2020).
4. Россия начала разработку электромагнитной катапульти. URL: <https://www.nanonewsnet.ru/articles/2014/rossiya-nachala-razrabotku-elektromagnitnoi-katapulty/> (дата обращения: 06.11.2020).
5. Сычёв В. Электромеханический аэрофинишер впервые «поймал» самолет. Оружие. Технологии. URL: <https://nplus1.ru/news/2016/10/18/hornet/> (дата обращения: 06.11.2020).
6. Иванов С. Электромеханический аэрофинишер посадил 22 самолета подряд. Хайтек. URL: <https://hightech.fm/2019/11/21/aag/> (дата обращения: 06.11.2020).
7. США испытали электромеханический аэрофинишер аварийной посадкой. 03.04.2019. Военное обозрение. URL: <https://topwar.ru/156376-sshaispytali-jelektromehanicheskij-ajerofinisher-avarijnoj-posadkoj.html/> (дата обращения: 06.11.2020).
8. Авдеев Ю. Робот под крылом самолета, «Красная звезда». URL: http://www.kadet.ru/doc/KZ25_02.html (дата обращения: 06.11.2020).

УДК 681.518

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-182-187

А. П. Григорьев*,**

старший преподаватель

С. Г. Бурлуцкий**

кандидат технических наук, доцент

* АО «КБ „Арсенал“ им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РЕАЛИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ НА БОРТУ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Для снижения общей массы и повышения полезной нагрузки предлагается рассмотреть возможность применения беспроводных датчиков на борту современных летательных аппаратов. Выбран беспроводной датчик давления, проведен анализ электромагнитной совместимости, предложен оптимальный стандарт беспроводной передачи данных, а также произведен подбор элементной базы для реализации процесса беспроводного измерения давления. Использование беспроводных технологий на борту, по мнению авторов статьи, позволит значительно снизить общую массу, повысить надежность, ремонтопригодность и возможность дальнейшей модернизации систем в целом.

Ключевые слова: беспроводной датчик, чувствительный элемент, протоколы беспроводной передачи данных, беспроводная сеть на борту летательного аппарата, летательный аппарат, реализация беспроводного обмена данными, беспроводной датчик давления, беспроводной стандарт.

A. P. Grigoryev ***

Senior Lecturer

S. G. Burlutskiy**

PhD, Tech., Associate Professor

*JSC «Arsenal Design Bureau named after M. V. Frunze», St. Petersburg

** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

IMPLEMENTATION OF WIRELESS DATA EXCHANGE ON AIRCRAFT BOARD

To reduce the total mass and increase the payload, it is proposed to consider the possibility of using wireless sensors on board modern aircraft. A wireless pressure sensor has been selected, an electromagnetic compatibility analysis has been carried out, an optimal standard of wireless data transmission has been proposed, and the element base has been selected for the implementation of the wireless pressure measurement process. The use of wireless technologies on board, according to the authors of the article, will significantly reduce the overall mass, improve reliability, maintainability and the possibility of further upgrading systems as a whole.

Keywords: wireless sensor, sensitive element, protocols of wireless data transmission, wireless network on board an aircraft, aircraft, realization of wireless data exchange, wireless pressure sensor, wireless standard.

С каждым годом технологии развиваются все более стремительно. Беспроводные способы передачи данных находят широкое применение в различных областях техники, в том числе и в авиационной промышленности. Экспертные оценки показывают, что внедрение беспроводных технологий позволит создать эффективные системы управления, контроля и диагностики нового поколения с гибкой, легко изменяемой структурой, уменьшить на 20–40% массу и габариты систем, повысить надежность (сокращение количества разъемов), снизить в 5–8 раз затраты на техническое обслуживание систем, упростить маршрутизацию и монтаж кабелей на борту, упростить модернизацию систем и повысить пожаробезопас-

ность [1]. Уже сейчас можно привести примеры успешного применения беспроводных способов передачи информации на борту летательных аппаратов (ЛА). Так, американская компания Securaplane technologies [2] разработала и успешно поставляет на рынок сертифицированную по RTCA/DO-160 беспроводную систему контроля задымления ST3000.

Однако, применение беспроводных технологий в таких критически важных системах, как управление полетом или работой двигателя, связано с рядом противоречивых требований. Для надежной передачи данных в режиме реального времени по радиоканалу между узлами беспроводной сети, находящимися вне пределов прямой видимости, с учетом затухания сигнала

необходимо увеличение мощности приемо-передатчиков [3].

В этой статье будут рассмотрены особенности применения беспроводных технологий в авиационных бортовых системах.

На борту ЛА существует множество систем и агрегатов, связанных между собой информационными каналами. Большинство этих связей реализовано посредством проводных соединений, причем чаще всего используются традиционные провода с медной жилой. Такие способы соединения зарекомендовали себя как достаточно надежные и простые.

В рамках проекта «WILDCRAFT» (Wireless Smart Distributed End System for Aircraft) европейской программы «Чистое небо» при выборе и анализе беспроводной связи в бортовой авиационной системе отмечены проблема согласования потребления электроэнергии со скоростью передачи данных, полосой частот и диапазоном [3]. Исследовались только стандарты связи на частоте 2,4 ГГц, которая принимается во всем мире как открытый нелицензируемый диапазон (использовались коммерческие COTS-компоненты Commercial Off-The-Shelf – «готовые к использованию» с низкой стоимостью, с термостойкостью до $+85^{\circ}\text{C}$).

Результаты оценки беспроводных протоколов ZigBee, Bluetooth и Wi-Fi по скорости передачи данных, энергопотреблению и удалению узлов показаны на рис. 1 [4].

Анализируя данные рис. 1, можно сделать вывод, что стандарт ZigBee обладает хорошими показателями по дальности передачи и по энергопотреблению. Следовательно, его целесообразно применять в автономных системах контроля и диагностики. К недостаткам следует отнести низкую скорость передачи данных (до 256 кбит/с). На сегодняшний день имеется широкая номенклатура беспроводных датчиков деформации, температуры, ускорения и т. д., выполненных на базе стандарта ZigBee в различных форм-факторах и поставляемых многочисленными разработчиками.

WiMAX (рис. 1) представляет собой отраслевую спецификацию стандарта IEEE 802.16 и обеспечивает наибольшую скорость передачи данных при самом большом энергопотреблении. Стандарт характеризуется широким диапазоном рабочих частот – от 2 до 11 ГГц и высокой скоростью передачи данных (10 Мбит/с) в радиусе 16 км.

Протокол IEEE 802.11, более известный как Wi-Fi (рис. 1), находится в пределах среднего уровня и обеспечивает достаточно высокую скорость передачи данных (до 900 Мбит/с) при средней дальности (несколько сотен метров на открытом пространстве) и среднем энергопотреблении.

В ходе проведенных исследований [3] было доказано, что при относительно больших объемах передаваемых данных от сенсорных уз-

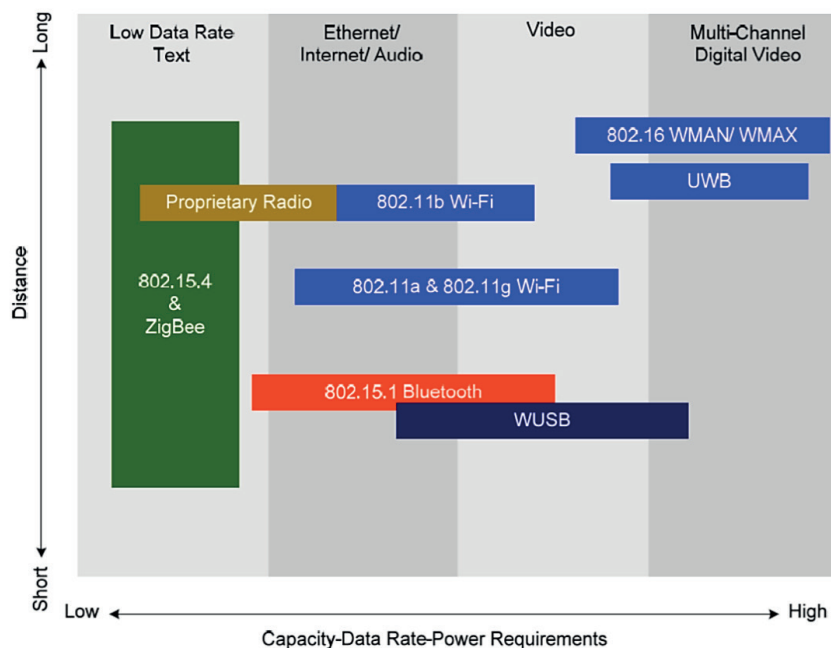


Рис. 1. Сравнительный анализ беспроводных стандартов

лов, содержащих несколько датчиков, эффективность Wi-Fi оказалась выше, чем ZigBee, даже несмотря на то, что передатчики Wi-Fi потребляют большую мощность по сравнению с ZigBee в режимах приема/передачи. Это является следствием того, что значительно увеличивается пропускная способность с лучшими удельными показателями расхода энергии (нДж/бит), но при общем сокращении рабочего времени аккумулятора, так как собственное потребление тока приемопередатчиками Wi-Fi в 2,5 раза выше, чем у ZigBee. Также стоит отметить, что одной из основных проблем при реализации беспроводных технологий на борту ЛА является низкая помехозащищенность, а также проблемы, связанные с электромагнитной совместимостью. При использовании беспроводных способов передачи информации важно, чтобы они не мешали работе бортового навигационного и радиооборудования. Бортовые системы самолета используют полосы частоты электромагнитного спектра от нескольких кГц до нескольких тысяч МГц. Например, в низкочастотной части спектра находится навигационная система Омега, которая работает в диапазоне частот 10–14 кГц. В высокочастотной части находится радиолокационная система погоды, которая работает на 5,440 и 9,350 МГц. Частотный диапазон работы некоторых систем самолета приведен в табл. 1 [5].

Таблица 1

**Радиочастотные диапазоны
бортовых систем самолета**

Частотный диапазон	Устройства
190–1750 кГц	Автоматический радиокompас
2–30 МГц	Высокочастотная радиосвязь
75 МГц	Маркерный радиомаяк
108–112 МГц	Курсовой посадочный радиомаяк
108–118 МГц	Курсовой всенаправленный радиомаяк
118–137 МГц	Сверхвысокочастотная радиосвязь
329–335 МГц	Глиссальный радиомаяк
962–1213 МГц	Дальномерное оборудование
1030, 1090 МГц	Система УВД
1030, 1090 МГц	Бортовая система предупреждения
1530–1660 МГц	Система спутниковой связи
1575,42 МГц	Система глобального позиционирования
4235–4365 МГц	Радиовысотомер
5031–5091 МГц	Микроволновая система обеспечения посадки
5440, 9350 МГц	Метеорологическая радиолокационная станция

Как видно из данных табл. 1, диапазоны частот 2,4 ГГц, используемые в стандартах ZigBee и Wi-Fi, не создадут помех для работы бортового оборудования.

Однако, ZigBee имеет значительно меньшее энергопотребление по сравнению с Wi-Fi, поэтому он является более предпочтительным при реализации на борту ЛА.

На современных самолетах, летающих на высотах около 10 км, очень важно контролировать внутренние параметры для системы жизнеобеспечения, такие как температура и давление в салоне. Для облегчения массы и повышения надежности предлагается использовать беспроводные датчики систем жизнеобеспечения.

Процесс разработки такого датчика будет рассмотрен на примере беспроводного датчика давления на борту ЛА. При разработке будут решены следующие задачи:

- выбор протокола беспроводной передачи данных;
- выбор цифрового манометра;
- выбор устройств для реализации приема, обработки и индикации полученной информации;
- построение структурной схемы и алгоритма работы.

В качестве оптимального (по критерию минимум энергопотребления и помехо-магнитная совместимость) протокола беспроводной передачи данных целесообразно выбрать ZigBee.

В качестве измерителя был выбран микропроцессорный датчик давления с радиоканалом специального исполнения Радон ТК – СИ производства компании ООО НПК МОДУЛЬ ИТС. Данный датчик предназначен для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами и обеспечивает непрерывное преобразование в унифицированные сигналы постоянного тока и напряжения постоянного тока и/или в цифровые сигналы в стандартах протокола HART или MODBUS RTU с интерфейсом RS-232; RS-232 TTL, RS-485 или по беспроводному интерфейсу (GSM, GPRS, Bluetooth, IrDA (ИК-порт), ZigBee, M2M 433/868 МГц). Датчик работает автономно от встроенной литиевой батареи. Время разряда батареи зависит от настроек датчика (периода связи и периода сохранения данных) и может составлять от 1 года до 10 лет. Датчики предназначены для работы в комплекте с устройством сбора данных, состоящего из радиомодема и ПЭВМ (рис. 2).

В качестве наиболее подходящего радиомодема был выбран XBee ZB производства компании Digi, показанный на рис. 3.

Данный радиомодуль работает на частоте 2,4 ГГц, имеет скорость передачи по радиоканалу



Рис. 2. Внешний вид беспроводного датчика давления



Рис. 3. Радиомодуль XBee ZB



Рис. 4. Внешний вид индикатора

лу до 250 кбит/с при дальности действия до 120 м на открытом пространстве и до 40 м внутри помещения. Имеет интерфейс UART. Мощность приемника – 96 дБм. Диапазон рабочих температур от -40 до $+85$ °C.

Для решения поставленных задач обработки поступающей информации о давлении и для индикации данных также требуется подобрать соответствующий вычислитель. Главное требование – минимальные массогабаритные характеристики и низкое энергопотребление. Учитывая данные требования, в качестве вычислителя выбран микроконтроллер серии PIC18F4520-E/P производства компании Microchip. Данное семейство микроконтроллеров отличается высокой производительностью и низкой ценой, высокой надежностью и долговечностью. Контроллер работает с тактовой частотой 40 МГц, что является достаточным условием, обеспечивающим качественную обработку входного сигнала с датчика давления и вывод значения на индикатор.

Для отображения измеряемого давления может быть использован любой индикатор, начиная от простейшего семисегментного и заканчивая ЖК-дисплеем с высоким разрешением. В данном случае выбор сделан в пользу жидкокристаллического индикатора FDCC2004D производства компании Fordata Electronics Co., Ltd (рис. 4).

Отображаемая на индикаторе информация организована в 4 строки, каждая из которых состоит из 20 символов. На печатной плате расположен контроллер. Тип поляризации ЖК – позитивный на просвет и отражение. Имеет фоновую светодиодную подсветку белого цвета. Знакогенератор – латинский/русский. Для пита-

ния всей системы были выбраны преобразователи МПВ-3.3 и МПВ3А производства компании ММП-Ирбис. Преобразователи конструктивно выполнены в металлическом корпусе, залитом компаундом. Модуль имеет защиту от короткого замыкания и от перегрузок. Потребление в выключенном состоянии – менее 0,15 мА. Преобразователи запитываются постоянным напряжением 27 В и имеют номинальное выходное напряжение 5 и 3,3 В соответственно. В качестве разъемов для питания и программирования выбраны соединители электрические прямоугольного типа СНП244 и СНП245.

Для предоставления экипажу информации о превышении максимально допустимого давления в кабине, а также для предупреждения о разгерметизации, предусмотрен звуковой сигнализатор. Сигнал на звуковой зуммер должен подаваться после сравнения текущего значения давления с допустимыми на данной высоте. В качестве зуммера был выбран пассивный HC0905A производства компании JL World с постоянным напряжением питания 5 В.

Исходя из всего вышеперечисленного, в соответствии с рис. 5 приведем структурную схему беспроводного измерителя давления.

Беспроводной измеритель функционально разбит на два блока:

- блок измерения давления;
- блок приема, обработки и индикации информации.

Блок измерения давления включает в себя беспроводной датчик измерения давления. Также допустимо использование нескольких подобных датчиков. В блок приема, обработки и ин-

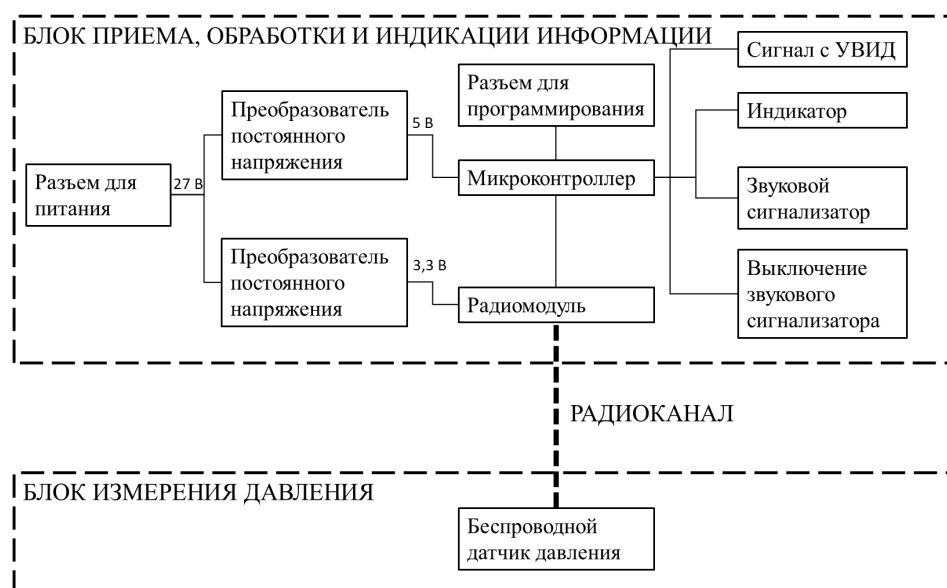


Рис. 5. Структурная схема беспроводного измерителя давления



Рис. 6. Алгоритм работы беспроводного датчика давления

дикации информации, находящийся в кабине экипажа, входят:

- разъем для питания 27 В;
- преобразователь постоянного напряжения;
- микроконтроллер;
- радиомодуль;
- индикатор информации;
- звуковой сигнализатор;
- кнопка выключения звукового сигнализатора и запуска нового цикла;
- разъем подключения к высотомеру УВИД-15Ф;
- разъем для программирования.

Для более наглядного описания принципа работы устройства, ниже представлен алгоритм (рис. 6).

Для описания работы измерителя был выбран пассажирский самолет Ил-86. Расположение блоков схематично представлено на рис. 7.

Алгоритм работы начинается с цикла, то есть процесс измерения будет повторяться бесконечно. Далее координатор (радиомодуль ZigBee) посылает сигнальный кадр, инициирующий начало работы датчика. Датчик измеряет текущее давление, и пересылает это значение обратно на радиомодуль (на блок приема, обработки и индикации информации). Блок приема, обработки и индикации информации получает сигнал с датчика, и обрабатывает его. Если полученное значение не выходит за рамки допустимого на текущей высоте полета, то сигнал подается на индикатор, и тот, в свою очередь, выводит текущее измеренное значение давления в салоне. В случае, если значение давления выходит за рамки допустимого на текущей высоте полета, то сигнал по-

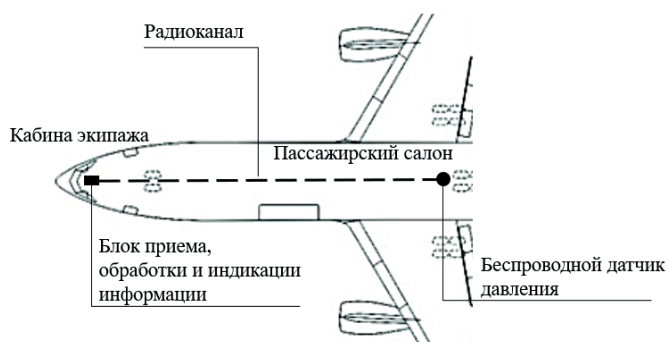


Рис. 7. Схематичное расположение блоков беспроводного измерителя давления на борту самолета Ил-86

дается на звуковой сигнализатор и затем на индикатор с сообщением об опасном превышении (понижении) давления. Значение текущей высоты подается на вход АЦП микроконтроллера в виде сигнала, снимаемого с электромеханического барометрического высотомера УВИП-15-Ф.

Таким образом, в данной статье наглядно продемонстрирована возможность применения беспроводных технологий на борту ЛА, рассмотрены основные стандарты беспроводной связи, осуществлен выбор наиболее предпочтительного для реализации на борту ЛА. Проведено сравнение технологий Wi-Fi, ZigBee и WiMAX, в части соотношения энергопотребления, дальности связи и скорости передачи данных. На примере пассажирского самолета Ил-86, показано применение беспроводного датчика давления на борту.

Подводя итоги, можно выявить преимущества и недостатки использования беспроводных систем передачи информации [6].

К преимуществам можно отнести:

- отсутствие необходимости прокладки кабелей для электропитания и передачи данных;
- относительно низкая стоимость монтажа и обслуживания беспроводных систем;
- снижение общей массы системы за счет полного отказа от проводов;
- минимальные ограничения по размещению беспроводных устройств;
- возможность расширения и модификации сетей без существенного вмешательства в процесс функционирования;
- надежность и отказоустойчивость всей системы в целом при нарушении отдельных соединений между узлами.

К недостаткам подобных систем можно отнести:

- необходимость применения автономных датчиков, и, следовательно, в подборе устройств с низким энергопотреблением;
- учет частотных диапазонов работы датчиков и рабочих частот бортовых систем;

– необходимость надежного стабильного соединения между приемником и передатчиком с требуемой скоростью передачи на заданное расстояние;

– слабую защиту от внешних помех.

Несмотря на все перечисленные недостатки, применение беспроводных технологий в аэрокосмической отрасли по мнению авторов статьи является перспективным и экономически эффективным.

Библиографический список

1. Гуревич О. С. Современные беспроводные технологии: проблемы применения на авиационном борту // Труды МАИ. Вып. 94.
2. Securaplane Technologies Inc.: SecuraNet™ WIRELESS TECHNOLOGY Intra Aircraft Wireless Data Bus for Essential and Critical Applications. 2007. URL: <http://www.securaplane.com/> (дата обращения: 15.01.2020).
3. Irizar A., Ruiz P. Future Challenges, roadmap for WSN and dissemination activities. Wireless Smart Distributed End System for Aircraft. 2014. URL: http://www.wildcrafteu.org/docs/20140331_Future-Roadmap-Dissemination_D111.pdf (дата обращения: 22.01.2020).
4. Hendrix J., Raimo J. Wireless 101: A look at a leading-edge technology // Siemens Building Technologies. Inc. 2016. URL: <http://www.slac.stanford.edu/xorg/nmtf/nmtftools.html> (дата обращения: 19.01.2020).
5. Kayton M., Kayton Engineering Company, Santa Monica, CA. One Hundred Years of Aircraft Electronics // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2003. Vol. 26, № 2. P. 193–213.
6. Дуркин Р. П., Григорьев А. П. Организация беспроводного обмена данными на борту космического аппарата // Семидесятая Международ. студ. науч. конф. ГУАП: сб. докл. Ч. 1: Техн. науки. СПб.: ГУАП, 2017. С. 49–50.

УДК 681.518

А. П. Григорьев*, **

старший преподаватель

С. Г. Бурлуцкий**

кандидат технических наук, доцент

Р. П. Дуркин *

инженер-конструктор 2-й категории

* АО «КБ „Арсенал“ им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА БАЗЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РАДИОКОМУТАТОРОМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИМ БЕСПРОВОДНУЮ ПЕРЕДАЧУ ДАННЫХ

Рассматривается возможность применения на борту современных космических аппаратов телеметрической системы с радиоконмутатором, поддерживающим беспроводной обмен данными с тепловизором. Техническое решение ориентировано для применения на протяженных космических аппаратах повышенной энерговооруженности с комбинированной полезной нагрузкой и сложной системой развертывания подвижных элементов конструкции, что обуславливает невозможность прокладки бортовой кабельной сети и использования контактных методов измерения температуры. Осуществлен расчет требуемого угла обзора тепловизора, обоснована схемная точка установки, обеспечивающая требуемое качество изображения. Проведен анализ и выбор оптимального (по критерию минимум масса-габаритных характеристик) беспроводного тепловизора обеспечивающего требуемое качество изображения, представлен обзор беспроводных интерфейсов и предложен оптимальный (по критерию минимум энергопотребления при требуемой дальности передачи). Методом конечных элементов проведен анализ твердотельных моделей тепловизора и панели батареи солнечной. Проанализированы радиационные факторы, действующие на тепловизор, предложены методики обеспечивающие его радиационную стойкость. Использование беспроводных технологий на борту космического аппарата, по мнению авторов статьи, позволит значительно снизить общую массу за счет отсутствия бортовой кабельной сети, повысить контролепригодность и, ремонтпригодность, а также обеспечит технологичность при проведении наземных электрорадиотехнических испытаниях.

Ключевые слова: современные космические аппараты, телеметрическая система, радиоконмутатор, бесконтактное измерение температуры, беспроводной тепловизор, протоколы беспроводной передачи данных, беспроводная сеть на борту космического аппарата.

A. P. Grigoryev***

Senior Lecturer

S. G. Burlutskiy**

PhD, Tech., Associate Professor

R. P. Durkin***

Category 2 Design Engineer

*JSC «Arsenal Design Bureau named after M. V. Frunze», St. Petersburg

**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ASSESSMENT OF THE STATE OF THE ON-BOARD SYSTEMS AND ELEMENTS OF THE SPACE VEHICLE DESIGN BASED ON A TELEMETRIC SYSTEM WITH A RADIO SWITCH PROVIDING WIRELESS DATA TRANSMISSION

The possibility of using a telemetry system with a radio switch supporting wireless data exchange with a thermal imager on board modern spacecraft is considered. The technical solution is designed for use on extended spacecraft of increased power-to-weight ratio with a combined payload and a complex system for deploying moving structural elements, which makes it impossible to lay an on-board cable network and use contact methods for measuring temperature. The calculation of the required viewing angle of the thermal imager has been carried out, the schematic point of the installation has been justified, which ensures the required image quality. The analysis and selection of the optimal (according to the criterion of minimum mass-dimensional characteristics) wireless thermal imager providing the required image quality is carried out, an overview of the wireless interfaces is presented and the optimal one (according to the criterion of minimum power consumption at the required transmission distance) is proposed. The analysis of solid-state models of a thermal imager and solar battery panel is carried out by the finite element method.

The radiation factors affecting the thermal imager have been analyzed, and methods have been proposed to ensure its radiation resistance. The use of wireless technologies on board the spacecraft, according to the authors of the article, will significantly reduce the total weight due to the absence of an on-board cable network, increase traceability and maintainability, and also ensure manufacturability during ground-based electrical and radio tests.

Keywords: modern spacecraft, telemetry system, radio switch, contactless temperature measurement, wireless thermal imager, wireless data transfer protocols, wireless network on board the spacecraft.

На борту космического аппарата (КА) существует множество бортовых систем (БС) и элементов конструкции изделия, которые требуют постоянного контроля со стороны телеметрической системы (ТМС). Традиционно данная задача решается путем установки в контрольных точках конструкции и посадочных местах БС различных датчиков и преобразователей, которые подключаются к ТМС с помощью электрических проводных каналов связи. Система коммутации ТМС обеспечивает сбор измерительных сигналов с подключенных датчиков, которые затем подвергаются обработке, оцифровке и упаковке в телеметрический кадр, передаваемый по радиоканалу на наземный пункт приема. Структурная схема традиционной проводной системы сбора данных (ПССД) приведена на рис. 1, где ЛК – локальный коммутатор; ФК – формирователь кадра; ДПА – датчикопреобразующая аппаратура.

Такие ПССД обладают следующими принципиальными недостатками:

- сложности при монтаже, связанные с прокладкой кабелей для передачи телеметрической информации и электропитания бортовой аппаратуры;

- усложнение поиска неисправностей, возникающих в проводных системах, так как на любом участке провода может возникнуть обрыв;

Применение беспроводных систем позволит решить эти и ряд других проблем. Беспроводные системы сбора данных (БССД) [2] имеют

множество преимуществ по сравнению с проводными системами:

- отсутствие необходимости в прокладке кабелей для электропитания и передачи данных;
- низкая стоимость монтажа, пуска наладки и технического обслуживания системы;
- минимальные ограничения по размещению беспроводных устройств;
- возможность внедрения и модификации сети на эксплуатируемом объекте без вмешательства в процесс функционирования;
- надежность и отказоустойчивость всей системы в целом при нарушении отдельных соединений между узлами [1].

При разработке беспроводных датчиков необходимо учитывать следующие факторы:

- необходимы автономные датчики, поэтому они должны потреблять минимальное количество энергии;

- частотный диапазон беспроводных датчиков и/или приборы не должен «пересекаться» с рабочими частотами различных радиотехнических систем КА.

Беспроводные устройства [3] особенно актуальны на протяженных КА (большие длины кабелей) и КА со сложной системой развертывания (громоздкие механизмы обеспечивающие отодвижение различных элементов конструкции и разматывание кабелей).

Рассмотрим актуальность применения беспроводных устройств на примере задачи измерения температуры на борту КА транспортно-

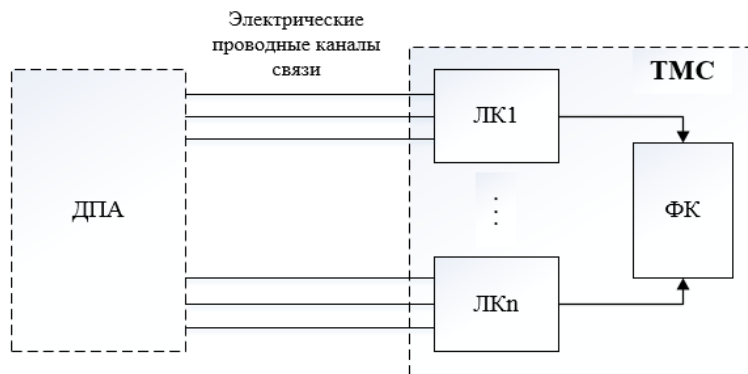


Рис. 1. Структурная схема ПССД

энергетического модуля (ТЭМ) [3], длина которого составляет 60–70 м. Существует два основных метода измерения температуры – контактные и бесконтактные. На КА ТЭМ целесообразно использовать бесконтактный способ измерения температуры (с помощью тепловизоров) систем обеспечения теплового режима (СОТР) ядерной энергетической установки (ЯЭУ), так как данный вариант даст полную картину теплового поля (градиент температуры) СОТР ЯЭУ, которое в свою очередь позволит определить места потенциальных тепловпотерь. Для получения адекватной картины теплового поля, тепловизоры должны быть размещены в местах близких к нормали объекта контроля. По конструктивным особенностям КА ТЭМ таким местом для расположения тепловизора является оконечность солнечной панели (рис. 2), где БОС – это блок обеспечивающих систем; СБ – солнечная батарея; БТ – беспроводной тепловизор.

Солнечные панели не предполагают размещения на них дополнительных проводных каналов связи (ограниченное количество токопроводящих колец; уже выстроена кабельная сеть без возможности изменения ее облика). Возможны два варианта решения данной проблемы: разработка новой солнечной панели с учетом размещения на них проводных тепловизоров и применение беспроводных тепловизоров. Первый вариант является финансово-затратным, поэтому целесообразно акцентировать внимание на втором.

Отметим, что БССД функционально можно разделить на три части:

- 1) средства первичного преобразования измеряемой величины (СПП);
- 2) блок транзита измерений (БТИ);
- 3) систему питания датчиков (СПД).

Обобщенная структура БССД показана на рис. 3.

В БТИ входят блок радиоопроса (БРО) и микроконтроллер. Отметим, что БРО представляет собой комплект радиомодулей, которые принимают радиосигналы от СПП, а микроконтроллер выполняет функцию узла управления работой радиомодулей БРО путем выдачи команд. Модуль управления питанием преобразует постоянное бортовое напряжение в напряжение, приемлемое для элементов БТИ. Формирователь кадра преобразует информацию, полученную от тепловизоров, в телеметрический кадр для ее дальнейшей передачи на Землю.

Основная цель применения датчиков с радиоканалом – это полностью избавиться от кабельной сети, однако отсутствие проводной связи создает новую проблему, связанную с организацией питания СПП. В традиционной ПССД питание поступает от ТМС, а в БССД ТМС лишается возможности обеспечивать питанием подключенные к ее коммутаторам датчики.

Для решения этой проблемы существуют следующие решения.

1. Использование автономных источников питания способных функционировать в течение всего срока летной эксплуатации изделия. На время работы автономных источников питания (аккумуляторных батарей) в составе БТ

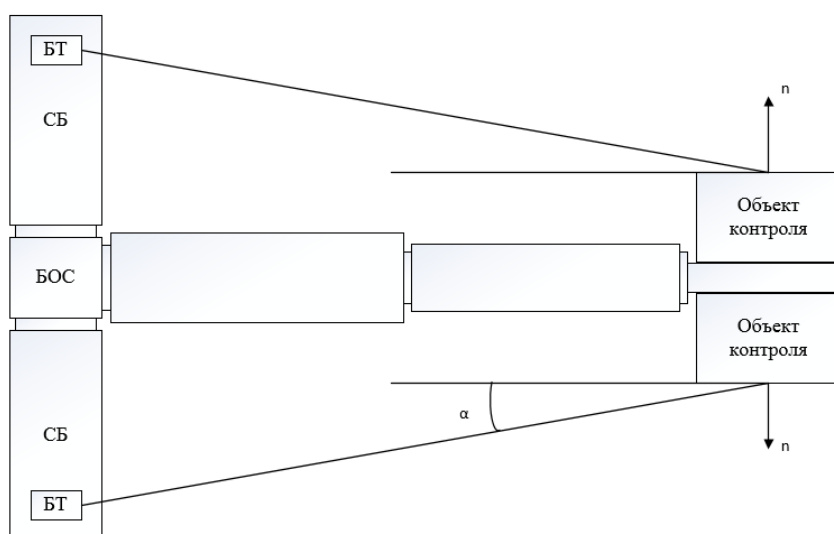


Рис. 2. Места расположения тепловизоров на КА ТЭМ

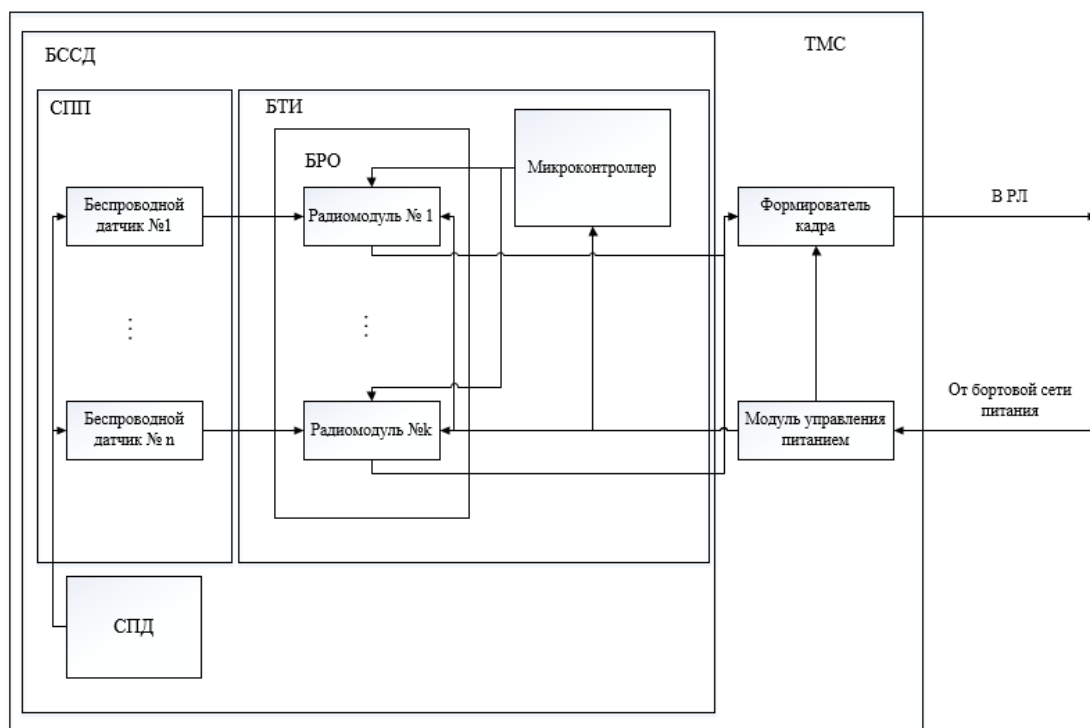


Рис. 3. Структурная схема БССД

влияет скорость передачи данных от тепловизора к приемнику, чем она ниже, тем ниже энергопотребление, следовательно, стоит акцентировать внимание на стандартах группы WPAN, так как они рассчитаны на низкоскоростные сети. При анализе стандартов беспроводных сетей (базовые характеристики стандартов беспроводных сетей представлены в табл. 1) выявлено, что наиболее предпочтительным является стандарт 802.15.4 и ZigBee.

Период «активности» устройств, выполненных по технологии ZigBee крайне малы, что обеспечивает продолжительный срок службы батареи [1].

2. Включение в состав БССД собственной системы генерации электроэнергии на:

- солнечных батареях;
- радиоизотопах.

После определения используемого беспроводного стандарта необходимо произвести расчет минимально требуемого поля зрения тепловизора (рис. 4). Условие расчета: равенство ширины поля (Ш) и максимального диаметра объекта (объект полностью входит в поле зрения и занимает собою весь кадр).

По определению угол поля зрения прибора наблюдения зависит от дистанции от камеры до объекта:

Таблица 1

Сравнение стандартов группы WPAN

Стандарт	802.15.3	802.15.4 и ZigBee	Bluetooth (802.15.1)
Скорость передачи, Мб/с	55–480	0,025–0,25	1–3
Диапазон, м	До 100	120	10–30
Частота, ГГц	2,4		
Описание	Разрабатывался как высокоскоростной стандарт WPAN-сетей для высокотехнологичных бытовых устройств (предназначенных, как правило, для передачи мультимедийных данных)	802.15.4 и ZigBee часто отождествляются, так в основе стандарта ZigBee лежит стандарт 802.15.4. Предусматривает большую область применения, а не «заточенность» под конкретные цели	На сегодняшний день хорошо развит и применяется для связи мобильных телефонов, КПК, периферии. Однако он не рассчитан на сети с низким энергопотреблением

Таблица 2

Поле зрения тепловизоров

Максимально требуемый угол	Минимально возможный угол
$\operatorname{tg}\left(\frac{Y}{2}\right) = \frac{2/2}{3,1} = 0,3226$	$\operatorname{tg}\left(\frac{Y}{2}\right) = \frac{2/2}{31} = 0,0323$
Это соответствует $17^{\circ}53' = 18^{\circ}$	Это соответствует $1^{\circ}51' = 1^{\circ}$
$Y = 2 \cdot 18 = 36^{\circ}$	$Y = 2 \cdot 1 = 2^{\circ}$

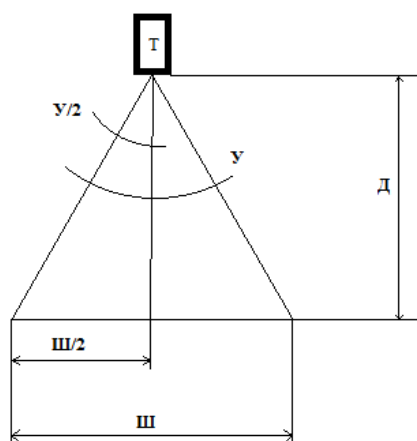


Рис. 4. Поле зрения тепловизора

$$\operatorname{tg}\left(\frac{Y}{2}\right) = \frac{\text{Ш} / 2}{D}. \quad (1)$$

Из этого выражения определяется максимально требуемый угол поля зрения, который позволит вместить в поле зрения объект максимального диаметра, расположенного на минимальном расстоянии от камеры. В этом случае прибор наблюдения будет охватывать все объекты с максимальным диаметром, расположенные на всех требуемых дистанциях. Также можно определить минимальный требуемый угол, при котором объект максимального диаметра, расположенный на максимальном расстоянии от камеры, полностью занимает кадр. В этом случае прибор наблюдения полностью охватит только объект максимального диаметра только на максимальном удалении от себя, а по мере приближения к прибору будет происходить «обрезание» изображения объекта. Тепловизоры должны распознавать объекты диаметром от 0,01 до 2,00 м на расстояниях от 3,1 до 31,0 м. Поле зрения тепловизоров представлено в таблице ниже (табл. 2).

Размер элемента разложения определяется по формуле:

$$H_{\text{элемент}} = 2 \cdot D \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{Y_{\text{элемент}}}{2}\right). \quad (2)$$

Угол обзора: $3240'$.

Число пикселей по длине: 1024.

Тогда угловой размер элемента разложения:

$$Y_{\text{элемент}} = \frac{3240}{1024} = 3,164'.$$

Дистанция: $D = 31$ м.

Тогда:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{Y_{\text{элемент}}}{2}\right) = \operatorname{tg}\left(\frac{3,164}{2}\right) \approx 0,0005,$$

$$H_{\text{элемент}} = 2 \cdot 31 \operatorname{tg}\left(\frac{3,164}{2}\right) \approx 0,0005.$$

В качестве тепловизора на основании расчета и сравнительного анализа таких характеристик как масса, габариты и мощность из трех изделий производства АО «НИИ телевидения» (табл. 3), выбрана камера тепло-телевизионная оптико-навигационного блока.

Внешний вид тепловизора показан на рис. 5.

Выбранные тепловизоры, хотя и отличаются низким энергопотреблением, но потребляют мощность около 2 Вт (для двух тепловизоров около 4 Вт). Вариант с питанием тепловизора солнечными батареями более актуален, так как они потребляют большую мощность нежели контактные датчики температуры, таким об-

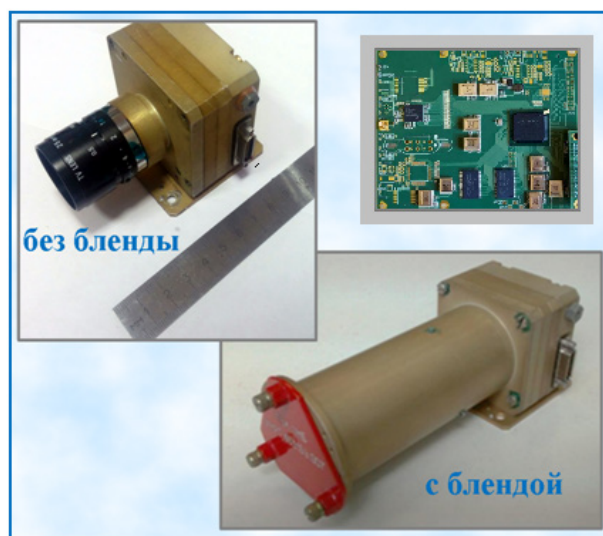


Рис. 5. Внешний вид тепловизора

Таблица 3

Сравнение характеристик тепловизоров АО «НИИ телевидения»

Параметр	Камера тепло-телевизионная оптико-навигационного блока	Камера КЛ-153М-1	Камера КЛ-154М
Состояние разработки	ОКР закончена	ОКР закончена	ОКР закончена
Формат Н×V, эл.	1024 × 1024	752×582	1000×1000
Размер элемента, мкм	5,5 × 5,5	6,5×6,25	15×15
Частота кадров, Гц	8	25	25
Интерфейс выходных данных	LVD/SSPI	Полный ч/б ТВ сигнал	Полный ч/б ТВ сигнал
Угол поля зрения Н × V, град	15°×15°	13,5×10,5 64×50	13,5×10,5 64×50
Габаритные размеры, мм	64×58×58 (без бленды) 64×58×161 (с блендой)	340×209×128	375×206×169,5
Масса, кг, не более	0,3	5	9
Потребляемая мощность, Вт, не более	2	10	15
Напряжение питания, В	5	27	27
Исполнение	Негерметичное	Герметичное	Герметичное
Температура окружающей среды, °С	От –50 до +50	От –10 до +40	От –10 до +40
Наличие подогрева	Нет	Да	Ла

разом, применение аккумуляторных батарей не является целесообразным. Организация питания от солнечных батарей позволит снизить масса-габаритные размеры за счет отсутствия громоздких кабелей питания и аккумуляторных батарей повышенной емкости. Батарея фотоэлектрическая (БФ) разрабатывается на базе трехкаскадных солнечных элементов (СЭ) из арсенида галлия на германиевых подложках со средним КПД – 26,71%. Очевидно, что БФ состоит из элементарных генераторов, установленных на лицевой поверхности панели и электрически соединенных параллельно через развязывающие устройства, устанавливаемые в выходных выводах электрогенератора (ЭГ). На

рис. 6 приведено изображение ФБ в виде структурной схемы.

Эквивалентная схема, как для кремниевых, так и для арсенид-галлиевых СЭ, может быть с достаточной достоверностью представлена генератором фототока, параллельно которому подключен диод, а в общей цепи – последовательное сопротивление. При обрыве СЭ ток генератора течет через шунтирующий диод (рис. 7), а ВАХ диода описывается уравнением:

$$U_d(I, T) = V_{tdb} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_{sdb}} + 1\right) + r_{db} \cdot I + K_{tddb} \cdot (T_0 - T), \quad (3)$$

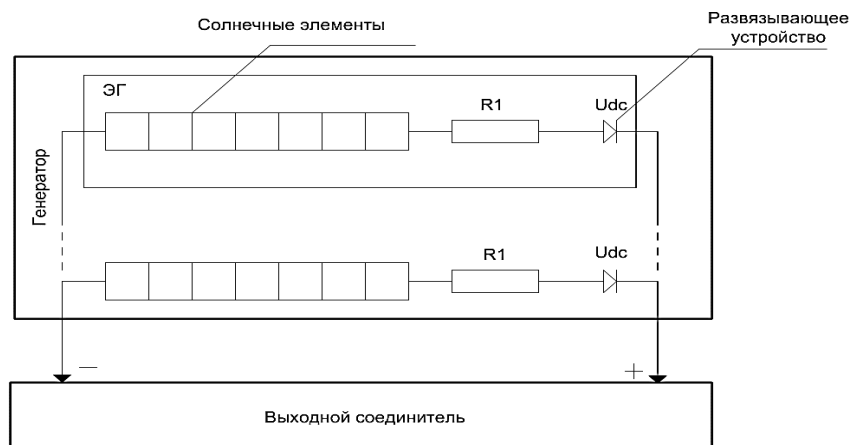


Рис. 6. Структурная схема БФ

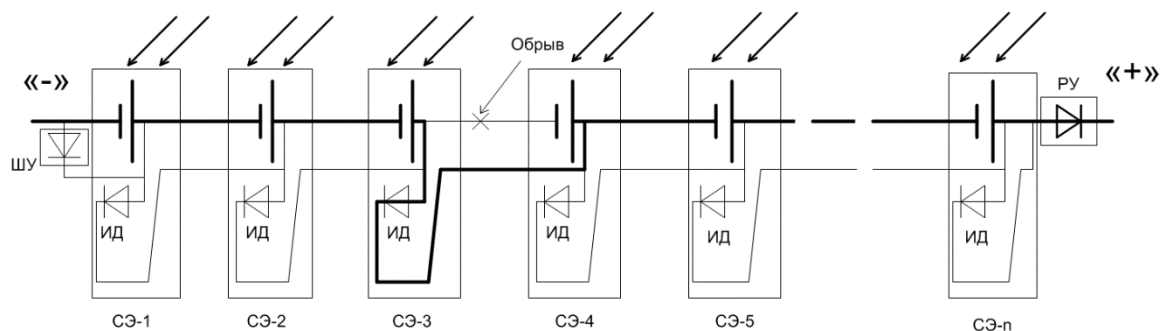


Рис. 7. Течение тока при обрыве СЭ

где I — ток, протекающий через диод, А; U_{db} — напряжение на диоде, В; r_{db} — внутреннее электрическое сопротивление диода, Ом; V_{tdb} — тепловой потенциал, В; I_{sdb} — ток насыщения диода, А; T_0 — температура в стандартных условиях, 25 град; T — температура диода, град; K_{tddb} — температурный коэффициент, В/град.

Использование СЭ со встроенными шунтирующими диодами сводит к минимуму потери мощности БФ из-за расколотых СЭ. Напряжение на соединителе (с учетом тока, протекающего по коммутирующим элементам и диодам) можно определить из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} U_{СЭС} = Un - I_g R_1 - U_{dc}(I_g) \\ I_{II} = I_g m \end{cases}, \quad (4)$$

где U — напряжение на СЭ, В; n — количество последовательно соединенных СЭ в ЭГ, шт.; m — количество ЭГ в генераторе (каркасе), шт.; I_g — ток ЭГ, равный ток СЭ, А; I_{II} — ток генератора (каркаса) БФ, А.

Таким образом:

$$\begin{aligned} n &= \frac{U_{СЭС} + I_g R_1 + U_{dc}(I_g)}{U} = \\ &= \frac{0,002\text{В} + 0,487\text{А} \cdot 0,010\text{Ом} + 0,7\text{В}}{2,5 \cdot 10^{-3}\text{В}} = \\ &= \frac{0,707}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 283. \end{aligned} \quad (5)$$

В одном элементарном генераторе 68 СЭ, таким образом, получаем следующее количество ЭГ:

$$m = 283 / 68 = 5. \quad (6)$$

Рассмотрим твердотельные модели тепловизора (рис. 8) и панели батареи солнечной (рис. 9), позволяющие подтвердить методом виртуального эксперимента возможность установки оптико-электронного прибора в выбранной схемной точке без потери прочностных (рис. 10–12) характеристик конструкции.

В результате виртуального эксперимента методом конечных элементов удалось оптимизировать выбор схемной точки размещения (на конце третьей секции) тепловизора с учетом максимизации угла обзора без потери прочности панели. Тем не менее такое «открытое» расположение цифрового оптико-электронного прибора требует проведения анализа воздействия радиационных факторов.

Радиация является одним из главных факторов, вызывающих возникновение отказов и сбоев в работе бортовых систем КА. Радиационная опасность на КА связана с различными радиационными эффектами, которые возникают в элементах оборудования, находящихся на бор-

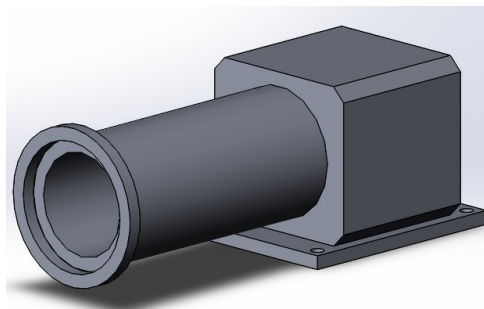


Рис. 8. Твердотельная модель тепловизора

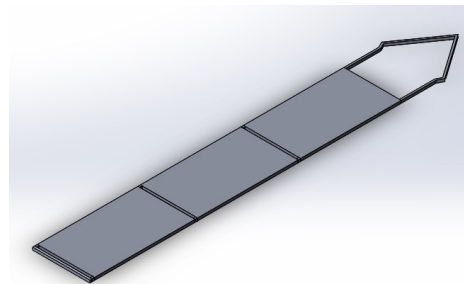


Рис. 9. Твердотельная модель панели батареи солнечной

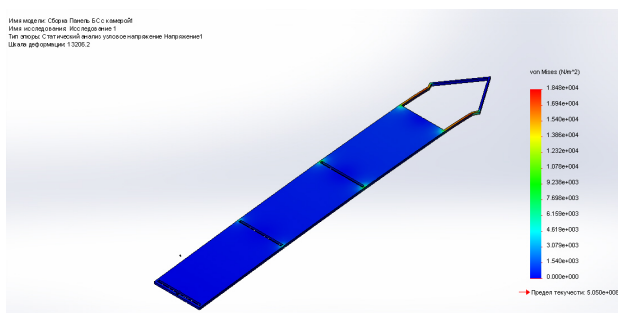


Рис. 10. Расчет напряжения на поверхности панели батареи солнечной

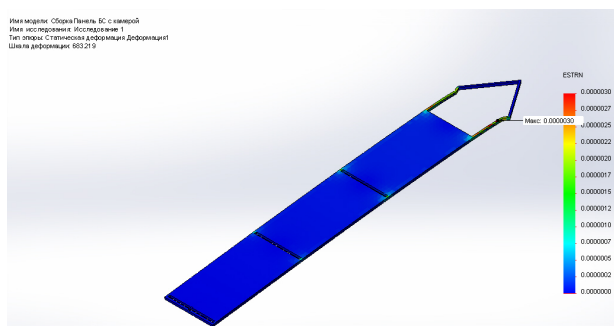


Рис. 11. Расчет деформации на поверхности панели батареи солнечной

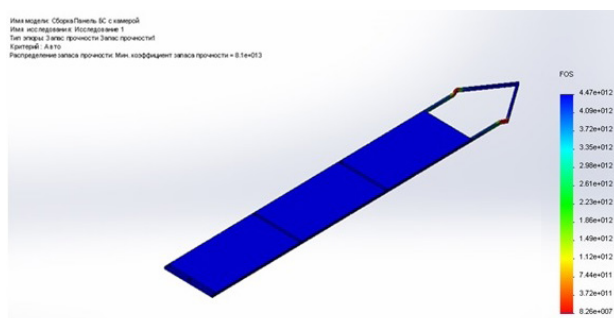


Рис. 12. Расчет запаса прочности на поверхности панели батареи солнечной

ту КА, в результате прохождения через них частиц высокой энергии.

Радиационные эффекты можно разделить на две категории: 1) дозовые эффекты (радиационные пояса земли, солнечные вспышки): возникают в полупроводниковых структурах в основном на разделах кремния и окисла. Приводят к сдвигу пороговых напряжений и отказам, связанным с уменьшением быстродействия вследствие изменения крутизны ВАХ;

2) эффекты одиночных сбоев (воздействие тяжелых заряженных частиц): включают в себя эффекты локальной ионизации и тиристорный эффект. Проявляются в изменении логического состояния элемента или логического выхо-

да. Неисправности этого типа могут возникать не только в логике, но и в блоках управления и блоках памяти.

Задача оценки радиационной стойкости разделена на два этапа:

- 1) расчет предельно допустимой накопленной дозы и расчет коэффициентов запаса (КЗ);
- 2) расчет вероятности возникновения одиночных сбоев и катастрофических отказов за время работы БРЭА.

Конструктивные способы повышения радиационной стойкости ЭК БССД: использование специальных корпусов, лаковой защиты покрытий, применение принципов резервирования и т. п. Этот способ требует применения специализированных материалов корпусов и покрытий. На этапе резервирования масштабирование схемы ограничено и для сохранения радиационной стойкости системы без ухудшения надежности из-за увеличения ее сложности важно установить баланс между резервированием и сложностью БССД [4].

При проектировании системы с беспроводными тепловизорами также нужно учитывать требования помехово-магнитной и электро-статической совместимости, то есть, вблизи не должны проходить силовые кабели, не должны быть расположены трансформаторы и выпрямители, а также различные радиотехнические приборы и системы, являющиеся мощными источниками помех.

Библиографический список

1. Шахнович И. А. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006. 288 с.
2. Дуркин Р. П., Григорьев А. П. Организация беспроводного обмена данными на борту космического аппарата // Семидесятая Международ. студ. науч. конф. ГУАП: сб. докл.: Ч. 1: Техн. науки. СПб.: ГУАП., 2017. С. 49–50.
3. Дуркин Р. П., Григорьев А. П. Оценка состояния бортовых систем и элементов конструкции космического аппарата посредством беспроводной передачи данных // Семьдесят первая Международ. студ. науч. конф. ГУАП: сб. докл.: Ч. 1: Техн. науки. СПб.: ГУАП, 2018. С. 149–153.
4. Коржеманов Д. Н., Гормаков А. Н. Методы обеспечения радиационной стойкости электронных компонентов искусственных спутников земли // Космическое приборостроение: сб. науч. трудов форума школьников, студ., аспирантов и молодых ученых с международ. участием. 10–12 апреля 2013 г., г. Томск / Национальный исследоват. Том. политехн. ун-т. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. С. 201–202.

УДК 681.7.026.6

А. П. Григорьев*,**

старший преподаватель

С. Г. Бурлуцкий**

кандидат технических наук, доцент

Е. Н. Фадеева**

магистрант

* АО «КБ „Арсенал“ им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАНЕСЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Рассмотрены вопросы изготовления вакуумных покрытий для оптических деталей, а также актуальные аспекты организации технологического процесса изготовления данных изделий, с акцентом на проблемные аспекты эксплуатации такого человеко-машинного (эргатического) оборудования, как вакуумная установка, в контексте мелкосерийного производства. Исследован технологический процесс нанесения вакуумных покрытий с применением системы фотометрического контроля толщины СФКТ-751В. Разработан технологический процесс нанесения вакуумных покрытий с целью получения оптимальной (по показателям требуемая точность и минимум подготовительных технологических операций) зависимости между качеством покрытия и временем технологических операций на единицу продукции (удельная трудоемкость изготовления), что, в конечном счете, потенциально позволит увеличить производительность и снизить себестоимость изготовления. По результатам натурного эксперимента на основании серии измерений контрольных образцов получены графики зависимости погрешность СФКТ-751В от времени прогрева и влияния времени прогрева на коэффициент отражения.

Ключевые слова: приборостроение, оптико-электронные приборы, нанесение оптических покрытий, вакуумная установка, система фотометрического контроля толщины.

A. P. Grigoryev*,**

Senior Lecturer

S. G. Burlutskiy**

PhD, Tech., Associate Professor

E. N. Fadeeva**

Postgraduate Student

*JSC «Arsenal Design Bureau named after M. V. Frunze», St. Petersburg

** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

STUDY OF THE PHOTOMETRIC SYSTEM IN THE APPLICATION OF OPTICAL FILMS

Within the framework of this article, the issues of manufacturing vacuum coatings for optical parts, as well as topical aspects of the organization of the technological process of manufacturing these products, with an emphasis on the problematic aspects of the operation of such man-machine (ergatic) equipment as a vacuum unit, in the context of small-scale production are considered. The technological process of applying vacuum coatings using the SFKT-751V photometric thickness control system has been investigated. A technological process for applying vacuum coatings has been developed in order to obtain the optimal (in terms of the required accuracy and a minimum of preparatory technological operations) relationship between the quality of the coating and the time of technological operations per unit of production (specific labor intensity of production), which, ultimately, will potentially increase productivity and reduce production cost. According to the results of a full-scale experiment on the basis of a series of measurements of control samples, graphs of the dependence of the error of the SFKT-751V on the heating time and the influence of the heating time on the reflection coefficient were obtained.

Keywords: instrumentation, optoelectronic devices, optical coating, vacuum installation, photometric thickness control system.

Оптика в современном приборостроении – это стремительно развивающаяся отрасль. К каждой оптической детали прибора устанавливаются жесткие требования и практически все они проходят операцию нанесения покрытия.

При нанесении тонких пленок на оптические детали в вакууме нельзя обойтись без спектрофотометрического контроля толщин. Для того чтобы получить качественное и соответствующее требуемым стандартам оптическое покрытие

тие, необходимо с высокой точностью измерять такие параметры формирования пленки, как скорость роста или толщина напыляемого покрытия. Сегодня для этих целей используются современные приборы, а мировыми лидерами в развитии спектрофотометрических приборов на сегодняшний день являются Германия и Япония. Но для контроля спектральных характеристик пленки при напылении в вакуумной камере, они предлагают не только системы измерения, но и готовые технологии по нанесению покрытий для данных систем, защищенных патентами от внесения в них каких-либо изменений. Такой подход имеет ряд минусов, так как существуют сферы отечественной промышленности, где использование готовых зарубежных технологий, не отвечающих российским стандартам, недопустимо. Такими отраслями, к примеру, являются военно-стратегическая промышленность, опытные производства и др. Предприятиям этих отраслей необходимо иметь полный контроль над технологиями с возможностью внесения корректировок и изменений в технологический процесс (ТП). А так как в Российской Федерации приборостроение в области спектрофотометрических устройств находится на низком уровне, то эту нишу на отечественном рынке заняла Республика Беларусь, предлагая свои устройства, незначительно уступающие Германским аналогам в производительности, но более дешевые. К примеру, для нанесения большинства видов покрытий достаточно возможностей разработанной еще в советские годы белорусскими конструкторами системы для спектрофотометрических измерений СФКТ-751В. Минусами данной системы являются ее значительные массогабаритные характеристики, а также наличие большого количе-

ства зеркал, что усложняет прецизионную настройку и юстировку прибора. Эта система позволяет контролировать коэффициент пропускания или отражения в определенной точке спектра, т. е. на одной, определенной длине волны в диапазоне от 250 до 1100 нм [2], что вполне достаточно для контроля нанесения большинства используемых в оптике покрытий (просветляющие, зеркальные, светопоглощающие, светоделительные, защитные и др.). Одной из особенностей данной системы фотометрического контроля толщины (СФКТ) является необходимость ее длительного прогрева перед началом работы, что усложняет ТП (возрастает время отдельных технологических операций), как следствие также способствует повышению себестоимости каждой отдельной единицы продукции.

В рамках данной статьи затронуты вопросы изготовления вакуумных покрытий [2] для оптических деталей изделий приборостроения с применением системы СФКТ-751В [1], а также актуальные аспекты организации технологического процесса (ТП) изготовления данных изделий, с акцентом на проблемные аспекты эксплуатации такого человеко-машинного (эргатического) оборудования, как вакуумная установка, в контексте мелкосерийного производства.

Основной задачей является разработка ТП нанесения вакуумных покрытий с целью получения оптимальной (по показателям требуемая точность и минимум подготовительных технологических операций) зависимости между качеством покрытия и временем ТП на единицу продукции (удельная трудоемкость изготовления), что, в конечном счете, потенциально позволит увеличить производительность и снизить себестоимость изготовления (за счет снижения степени амортизации основных производственных фондов). Систе-

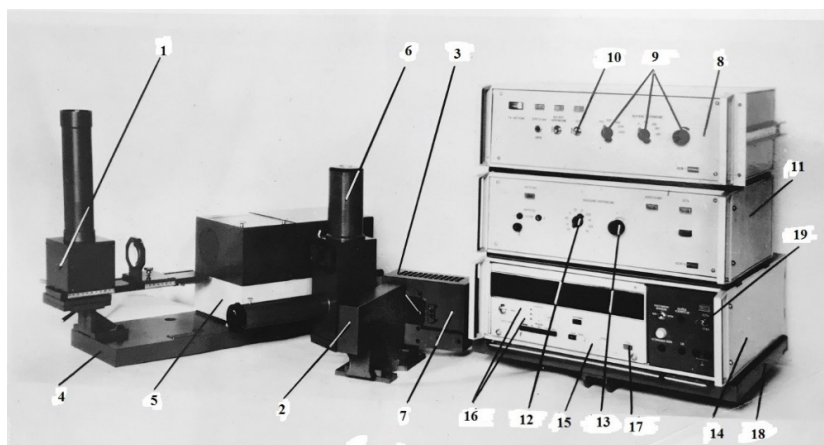


Рис. 1. Состав системы фотометрического контроля толщины СФКТ-751В

ма фотометрического контроля толщины СФКТ-751В предназначена для контроля оптической толщины тонких пленок в процессе их напыления. В нее входят следующие элементы (рис. 1): верхний блок пропускания (1); нижний блок пропускания (2) с фокусирующей трубкой (6); блок источника излучения (3); стол (4) с монохроматором (5); блок отражения (7); источник постоянного тока УБПН-3 (8), (9) и (10) – элементы управления напряжением питания источника излучения; высоковольтный блок питания УБПВ-1 (11), (12) и (13) – элементы управления высоким напряжением; блок регистрации (14), состоящий из усилителя (19) и цифрового вольтметра (15); (16) и (17) – элементы управления вольтметром; стойка для размещения СФКТ на каркасе вакуумной установки (18).

Система фотометрического контроля толщины устанавливается на специальной стойке, рядом с блоком управления вакуумной установки и действует по принципу фотоэлектронного регистратора светового потока, который пропущен через напыляемый образец, либо отражен от него. Об изменении оптической толщины пленки напыляемого вещества судят по изменению коэффициентов отражения или пропускания образца [1].

Рассмотрим оптическую схему системы измерения толщины пленки по контролю ее отражения. В нее входят оптические схемы блока отражения, элементов вакуумной камеры, монохроматора с приемником световой энергии [1]. Световой поток от лампы накаливания (1) плоским зеркалом (2) направляется на линзу (3), которая фокусирует изображение лампы на плоскость образца (4), отражается от него, возвращается через окно (5) и попадает на линзу (6), которая в паре с плоским зеркалом (7) и линзой (8) создает изображение нити лампы на входной щели (9). Далее, световой поток попадает в монохроматор. Линзы, которые имеются в составе схемы, вносят aberrацию хроматизма положения, которую компенсирует смещение линзы (8) вдоль оптической оси. Пройдя входную щель монохроматора (9), излучение попадает на вневсевое параболическое зеркало (10) и отклоняется им на плоскую дифракционную решетку (11). Дифрагированный световой поток от решетки попадает обратно на параболическое зеркало и фокусируется им, посредством плоского зеркала (12), на выходной щели (13). Затем излучение попадает непосредственно на приемную площадку фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). ФЭУ меняется оператором в зависимости от рабочего диапазона спектра (таблица) и помещается непосредственно за выходной щелью. Для

того, чтобы «обрезать» мешающее излучение, используются фильтры отрезающего типа (14), устанавливаемые на отверстие в районе входной щели. Входная и выходная щели имеют симметричное раскрытие [1]. Все входные окна и линзы изготовлены из специального материала ФК-У (фтористый кальций, ультрафиолет), а выходное окно камеры – из КУ-1 (кварц, ультрафиолет) [3]. Это сделано для того, чтобы коротковолновое ультрафиолетовое излучение беспрепятственно проходило внутрь камеры и давало возможность контролировать толщину пленки на относительно коротких длинах волн (от 250 нм). Для усиления оптического сигнала, который поступает с фотоэлектронного умножителя, используется селективный усилитель переменного тока. Непосредственно с него снимается электрический сигнал цифровым вольтметром постоянного тока, по показаниям которого оператор вакуумной установки следит за оптической толщиной покрытия.

Для исследования влияния времени прогрева на погрешность СФКТ и возможности сокращения этого времени, необходимо произвести контрольные напыления образцов с последующими измерениями их спектральных характеристик. Для этого выбрано довольно распространенное, менее трудоемкое, в сравнении с другими, и хорошо воспроизводимое просветляющее покрытие В.005 для $\lambda = 870$ нм, по ОСТ 3-19-01-95 [4]. Согласно этому стандарту, отражение в заданной точке не должно превышать 0,5% от каждой стороны оптической детали. В качестве подложки используются контрольные образцы из стекла марки К8. Пленкообразующие материалы – ZrO_2 и SiO_2 . Напыления будут производиться на установке ВУ-1А, а измерения – на приборе PhotonRT [5].

Технологический процесс состоит, прежде всего, из расчета режима напыления веществ на оптические детали, который оператор отслеживает в процессе, при помощи фотометрического устройства. Для того, чтобы рассчитать режим нанесения пленки, технолог должен знать область спектра прибора, где должна работать деталь, материал этой оптической детали, называемой подложкой, какие виды покрытий установлены для этого материала ГОСТами [6], какие пленкообразующие вещества обладают хорошей адгезией с этим материалом, но главное – знать и уметь рассчитывать требуемое покрытие. Основными видами вакуумных покрытий являются просветляющие, зеркальные, светоделительные, защитные, фильтрующие и др. [4]. Практически все эти покрытия допускается наносить на различные области спектра (таблица).

Длина волны различных областей спектра

Область спектра	Длина волны, нм
Ультрафиолетовая область	180–380
Видимая область	380–760
Инфракрасная область	760–5000

В качестве примера в данной статье используется стекло марки К8, имеющее отражение от каждой полированной поверхности детали 4%.

Задачей исследования является нанесение на деталь просветляющего двухслойного покрытия В.005 для длины волны = 870 нм, так, чтобы в этой точке отражение снизилось с 4 до ≤0,5%.

Покрытия, наносимые на поверхность оптической детали в целях уменьшения потерь на отражение, получили название просветляющих, так как их применение приводит к увеличению количества света, проходящего через оптическую систему, а значит, наблюдаемое изображение становится ярче и четче.

При разработке ТП, технолог рассчитывает контрольную длину волны, которую оператор выставляет на фотометрическом устройстве.

Формула для расчета контрольной длины волны [4]:

$$nd = \frac{\lambda}{4}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления стекла (в нашем случае, $n=4$); d – геометрическая толщина пленки; λ – длина волны.

Получив задание от технолога, оператор приступает к работе. Сначала происходит чистка деталей, закладка в специальные металлические оправы и загрузка в вакуумную камеру. Напыления химических веществ происходят при определенном вакууме. Когда достигается нужное значение вакуума в камере, оператор включает приборы фотометрической системы контроля толщины и прогревает их в течение 30 мин. Далее оператор приступает к непосредственному нанесению покрытия. Для лучшей адгезии в процессе откачки вакуумной камеры, производится ионизация – ионная очистка поверхности подложки тлеющим разрядом.

В работе эмпирически доказано, что время прогрева, составляющее значительную часть ТП, потенциально можно снизить до некоторого расчетного минимума, без потери качества покрытия (требований качества покрытия в соответствии с нормативной документацией контролируется ОТК). Исследование проводилось на примере нанесения просветляющего двухслойного покрытия. Материал подложки – стекло марки К8, а структура покрытия – двуокись

циркония ZrO_2 + двуокись кремния SiO_2 [7]. Для этого произведено поочередное напыление пяти контрольных образцов, каждый раз снижая время прогрева СФКТ-751В. Полученные образцы переданы в Оптико-Техническую Лабораторию, где происходят измерения полученного отражения, которое должно отвечать требованиям к данному покрытию и не должно превышать 0,5%.

Измерения проведены на приборе «Photon RT», предназначенном для измерения спектральных характеристик отражения, пропускания и оптической плотности плоских оптических деталей и покрытий на них в поляризованном свете [5]. Контрольный образец № 0 (без покрытия). Для наглядности оптических свойств покрытия проведем измерение отражения от поверхности контрольного образца без покрытия (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что коэффициент отражения от поверхности подложки из стекла марки К8 на контрольной области спектра (800–1000 нм) составляет около 4%.

Контрольный образец № 1: марка стекла К-8, контрольная длина волны 870 нм. Время прогрева СФКТ – 30 мин. Интервал измерений 10 нм (рис. 3).

По данным из графика и таблицы (рис. 3) видно, что коэффициент отражения (R) меньше 0,5% в измеряемом диапазоне от 800 до 930 нм. Минимальная точка $\lambda = 850$ нм, отражение в ней равно 0,03%. В заданной точке спектра

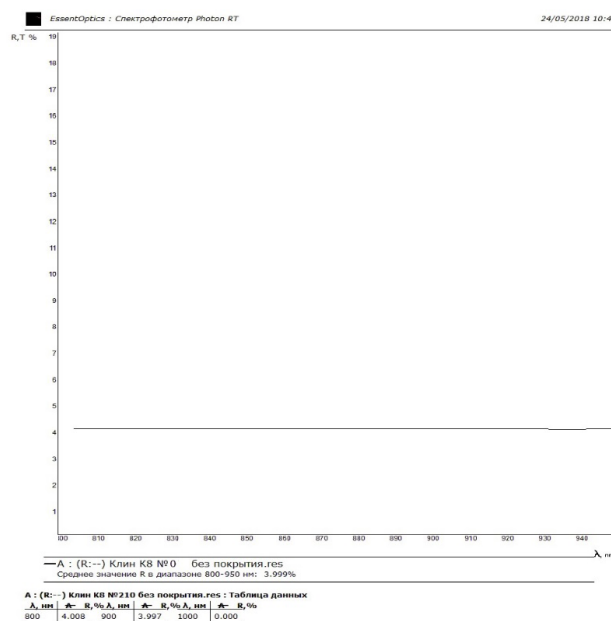


Рис. 2. Контрольный образец из стекла марки К8 без покрытия

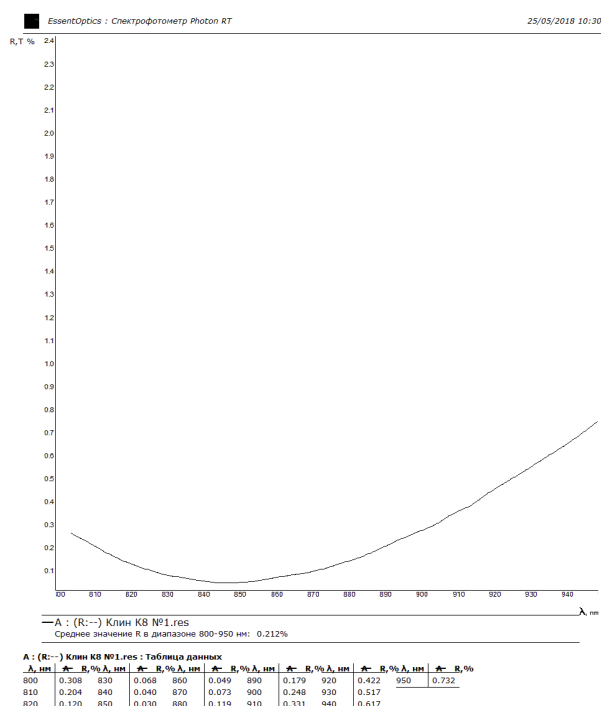


Рис. 3. Контрольный образец из стекла марки К8 с двухслойным просветлением.
Время прогрева – 30 мин

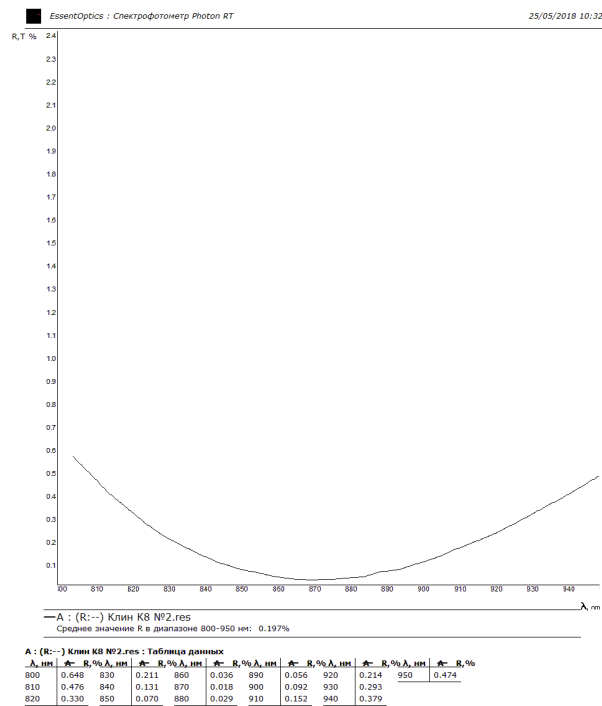


Рис. 4. Контрольный образец из стекла марки К8 с двухслойным просветлением.
Время прогрева – 25 мин

$\lambda = 870$ нм, отражение от поверхности оптической детали равно 0,07%, что соответствует заданным требованиям.

Контрольный образец № 2: марка стекла К8, контрольная длина волны 870 нм. Время прогрева фотометрического устройства – 25 мин. Интервал измерений – 10 нм (рис. 4).

По данным рис. 4 и таблицы видно, что значения имеют незначительный характер и отчасти обусловлены погрешностью измерительного прибора. Отражение (R) меньше 0,5% в диапазоне от 810 до 950 нм. Минимальное значение коэффициента отражения совпадает с заданной точкой спектра $\lambda = 870$ нм и составляет 0,018%.

Контрольный образец № 3: марка стекла К-8, контрольная длина волны 870 нм. Время прогрева фотометрического устройства – 20 мин. Интервал измерений – 10 нм (рис. 5).

По данным из графика и таблицы (рис. 5) видно, что значения снова имеют незначительный характер и отчасти обусловлены погрешностью измерительного прибора. Отражение (R) меньше 0,5% в диапазоне от 810 до 940 нм. Минимальное значение коэффициента отражения совпадает с заданной точкой спектра $\lambda = 870$ нм и составляет 0,018%.

Контрольный образец № 4: марка стекла К8, контрольная длина волны 870 нм. Время

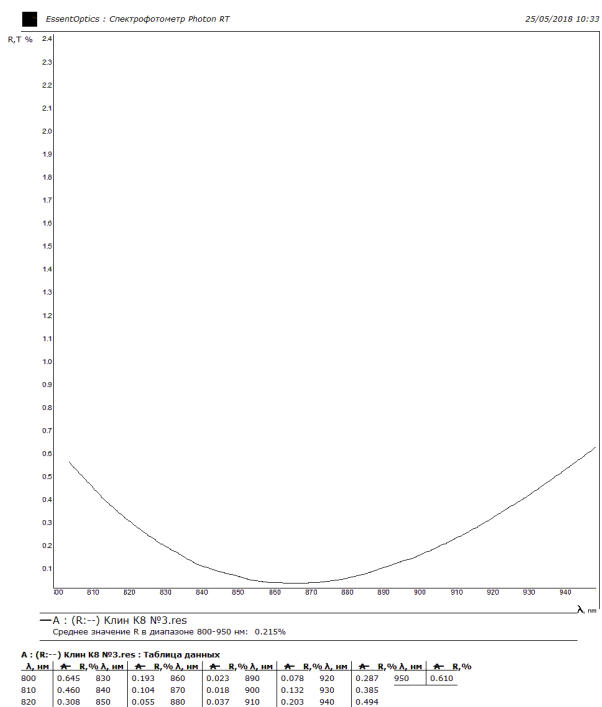


Рис. 5. Контрольный образец из стекла марки К8 с двухслойным просветлением.
Время прогрева – 20 мин

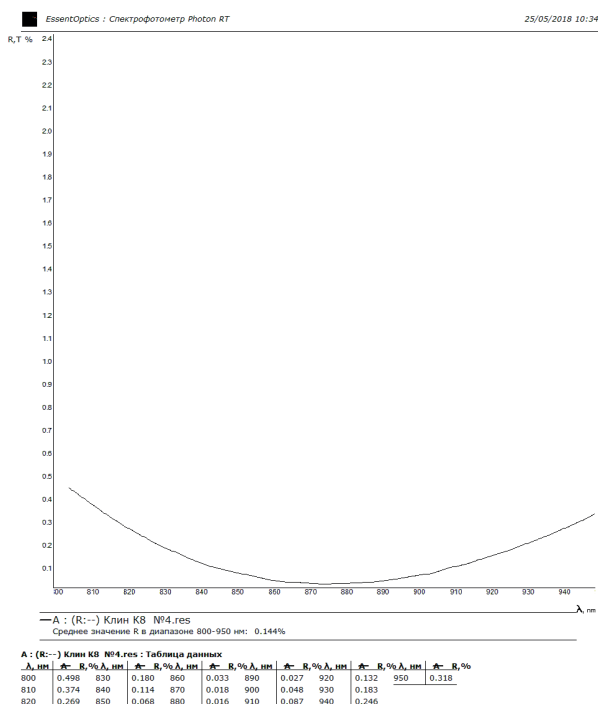


Рис. 6. Контрольный образец из стекла марки К8 с двухслойным просветлением.
Время прогрева – 15 мин

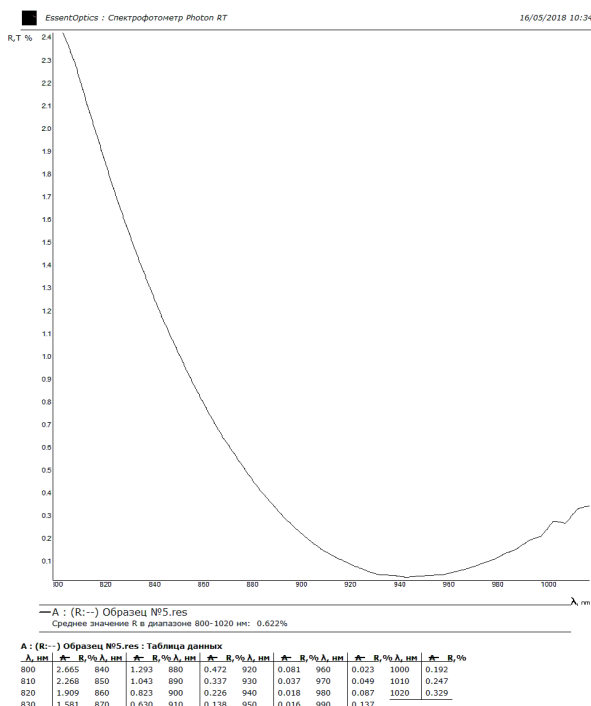


Рис. 7. Контрольный образец из стекла марки К8 с двухслойным просветлением.
Время прогрева – 10 мин

прогрева фотометрического устройства – 15 мин. Интервал измерения – 10 нм (рис. 6).

На рис. 6 наблюдается изменение кривой и значения отражения. В точке 870 нм коэффициент отражения составляет 0,018%, но минимальная точка теперь расположена на длине волны $\lambda = 880$. На этом этапе можно сделать вывод, что по мере снижения времени прогрева СФКТ-751В, экстремум коэффициента отражения нанесенного покрытия смещается в длинноволновую область.

Образец № 5: марка стекла К8, контрольная длина волны – 870 нм. Время прогрева фотометрического устройства – 10 мин. Интервал измерения – 10 нм (рис. 7).

На рис. 7 уже существенно видны изменения. Значение коэффициента отражения меньше 0,5% находится в измеряемом диапазоне от 880 до 1020 нм. В заданной точке $\lambda = 870$ нм, $R = 0,630$ нм, что выходит за поля допуска эксперимента.

Детали с таким несоответствием спектральных характеристик с заданными в чертеже, отбраковываются ОТК и отправляются в брак или переполировку (исправимый брак).

На основании результатов измерений контрольных образцов для наглядности целесообразно представить графики зависимости погрешность СФКТ от времени прогрева (рис. 8) и влияния времени прогрева на коэффициент отражения (рис. 9).

Исходя из графиков (рис. 8; 9), можно сделать вывод, что оптимальным является время прогрева, равное 15 мин. Дальнейшее уменьшение этого значения приводит к резкому увеличению погрешности СФКТ, что может привести к такому несоответствию измерений и фактических параметров пленки, что показание коэффициента отражения выходит за поле допуска, заданное на это покрытие, в следствие чего может произойти отбраковка напыляемых изделий.

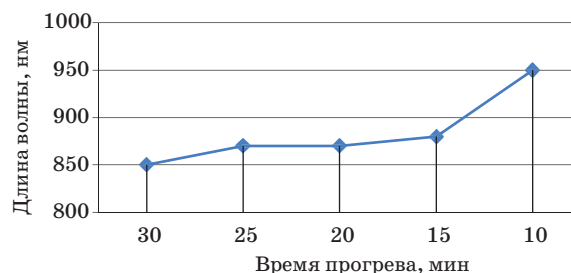


Рис. 8. Влияние времени прогрева СФКТ на экстремум просветляющего покрытия



Рис. 9. Влияние времени прогрева СФКТ на коэффициент отражения (контрольная длина волны $\lambda = 870$)

Для проведения «Фотографии рабочего дня» с целью изучения экономической составляющей результата исследования, был приглашен нормировщик. Для напыления одной стороны детали, ранее, время составляло 1 час 30 мин и 3 ч соответственно (если покрытие наносится на обе стороны). Исследование показало, что это время можно сократить без ущерба качеству и другим характеристикам детали и используемого оборудования, до 1 ч 15 мин на одну сторону. Покрытие детали с двумя рабочими сторонами составляет 2 ч 30 мин. Таким образом, за рабочую смену в 8 ч, оператор вакуумной установки способен совершить дополнительную «откачку». Из таких расчетов можно сделать вывод, что, с уменьшением времени прогрева системы фотометрического контроля СФКТ-751В, производительность ВУ по нанесению покрытий повысится с коэффициентом, равном 1,2, т. е. на 120%.

Подводя итоги исследования стоит отметить, что в целом СФКТ-751В зарекомендовала себя в области нанесения оптических вакуумных покрытий, как безотказная, относительно простая и универсальная система. Ремонтпригодность и взаимозаменяемость всех ее элементов

позволяет поддерживать работу в современных условиях и, как следствие, получать характеристики, заданные в техническом описании (ТО) и паспорте. При грамотных технологических расчетах СФКТ-751В позволяет контролировать и корректировать в процессе нанесения довольно широкую область различных вакуумных покрытий.

Полученные в рамках данной статьи результаты могут служить необходимым заделом при проведении работ, направленных на повышение точности и производительности СФКТ-751В, что потенциально позволит увеличить конкурентоспособность и востребованность данной системы на отечественном рынке.

Библиографический список

1. Комплекс фотометрического контроля толщин СФКТ-751В – техническое описание и инструкция по эксплуатации. URL: <https://www.chipmaker.ru/files/file/11327/> (дата обращения: 23.11.2020).
2. Андреев С. В., Губанова Л. А., Путилин Э. С. Методические указания к лабораторному практикуму по курсу «Оптические покрытия». СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 151 с.
3. Лебедева В. В. Техника оптической спектроскопии. М.: Изд-во МГУ, 1986. 352 с.
4. Ларищев А. П. Технология тонкослойных покрытий. М.: Изд-во Машиностроение, 1983. 184 с.
5. ОСТ 3-19-01-95. Покрытия оптических деталей. Типы, основные параметры и методы контроля. URL: https://www.studmed.ru/ost-3-1901-95-pokrytiya-opticheskikh-detaley-tipy-osnovnye-parametry-i-metody-kontrolya_21809e7c645.html (дата обращения: 23.11.2020).
6. Спектрофотометр «Photon RT»: паспорт, руководство по эксплуатации.
7. Франкомба М. Х., Гофман Р. У. Физика тонких пленок. М.: Изд-во Мир, 1973. 392 с.

УДК 629.78

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-203-205

В. В. Езерский*

доктор технических наук, профессор

А. Л. Кунтуров*

кандидат военных наук

С. А. Кунтуров*

ассистент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СТРАТЕГИЯ ОЦЕНИВАНИЯ ГОТОВНОСТИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ПРЕДНАЗНАЧЕНИЮ

Рассматривается стратегия оценивания готовности орбитальной группировки космических средств к выполнению задач по предназначению, описываются пять моделей сценариев стратегии сохранения статус-кво и рассчитывается коэффициент совокупной готовности космических средств, входящих в состав орбитальной группировки при реализации различных сценариев стратегии.

Ключевые слова: космические аппараты, орбитальная группировка космических средств, коэффициент совокупной готовности, стратегии в космической деятельности.

V. V. Yezersky*

Dr. Sc., Tech., Professor

A. L. Kunturov*

PhD, Military

S. A. Kunturov*

Assistant

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

STRATEGY FOR EVALUATING THE READINESS OF THE ORBITAL GROUP OF SPACE VEHICLES TO PERFORM THE PURPOSE TASKS

The article discusses a strategy for assessing the readiness of an orbital constellation of space assets to perform tasks as intended, describes five models of scenarios for the strategy of maintaining the status quo, and calculates the coefficient of the aggregate availability of space assets included in the orbital constellation when implementing various strategy scenarios.

Keywords: spacecraft, orbital constellation of space assets, aggregate readiness ratio, strategies in comic activity.

Введение

В космической деятельности выделяют два типа стратегии: первый тип – выработка плана действий по преобразованию системы управления деятельностью; второй тип – выбор цели, задач, этапов реализации проекта. Для любой стратегии основополагающим является понимание цели и способов ее достижения [1–3].

Рассматривая стратегии второго типа, можно выделить группы со своими конкретными целями космической деятельности: космическая связь, дистанционное зондирование Земли, навигация, военный космос и т. п. [4, 5].

Сообразно выбранной главной цели деятельности формируется соответствующий вид стратегии и набор тактических задач (табл. 1).

Сохранение достигнутого уровня работоспособности ОГ КСр

Стратегия сохранения статус-кво ОГ КСр может быть рассмотрена совместно с тактикой принятия решений при возникновении различных нештатных ситуаций на КСр ОГ. Обоснованная стратегия и хорошо продуманная тактика помогают успешно справиться со многими трудностями и проблемами, возникающими в ОГ КСр, а нейтрализация дисфункциональных проявлений

Таблица 1

Цели и задачи стратегий

Цель	Стратегия	Задачи
Создание ОГ КСр	Стратегия становления	Разработка проекта ОГ КСр. Производство космических средств. Организация передачи информации Заказчику
Выживание ОГ КСр	Стратегия выживания	Снижение уровня рисков. Сокращение штатов наземного пункта управления (НПУ). Поиск новых применений, направлений использования ОГ КСр. Экономия средств
Сохранение достигнутого уровня работоспособности ОГ КСр	Стратегия сохранения статус-кво	Удержание достигнутого качества и количества работ КСр на орбите. Мониторинг конъюнктуры для удержания позиций. Нейтрализация дисфункциональных проявлений в работе ОГ КСр
Повышение работоспособности (наращивание группировки)	Стратегия экспансии	Расширение рынка сбыта в рамках повышения качества жизни на Земле. Увеличение производительности ОГ КСр. Наращивание ОГ

* ОГ КСр – оценивание готовности орбитальной группировки космических средств.

в работе КСр способствует поддержанию ОГ в заданной степени технической готовности [6, 7].

Взяв за основу, результаты экспертной диагностики комплексных показателей (коэффициенты готовности, технического использования, сохранения эффективности) КСр, можно рассчитать обобщенную интегральную оценку – коэффициент совокупной готовности КСр к выполнению задач по предназначению G , являющийся количественным дифференциальным показателем ресурсного потенциала каждого оцениваемого i -го КСр.

W_{\max} – максимальная величина совокупной надежности:

$$W_{\max} = \sqrt{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2}, \quad (1)$$

где a_m, b_m, c_m – максимальные значения коэффициентов: готовности, технического использования, эффективности.

W_i – совокупная надежность i -го КСр:

$$W_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2}, \quad (2)$$

где a_i, b_i, c_i – значения коэффициентов: готовности, технического использования, эффективности i -го КСр.

h_i – величина проекции W_i на W_{\max} :

$$h_i = \frac{a_i a_m + b_i b_m + c_i c_m}{W_{\max}}. \quad (3)$$

Коэффициент совокупной готовности G i -того КСр к выполнению задач по предназначению можно рассчитать по формуле:

$$G_i = \frac{h_i}{W_{\max}}. \quad (4)$$

Введенная формула дает возможность вычислить G_i – коэффициент совокупной готовности

i -го КСр к выполнению задач по предназначению, что позволит оценить по этому показателю все КСр входящие в состав ОГ.

Сценарный подход является одним из основных подходов к пониманию проблем, возникающих в процессе космической деятельности [8, 9]. Он нацелен на поиск и оценку возможных нештатных ситуаций и их последствий, с целью определения окна возможностей дальнейшего выполнения или прерывания деятельности КСр и (или) ОГ КСр.

Опираясь на разработанную методику расчета коэффициента совокупной готовности КСр можно рассчитать средние значения коэффициента совокупной готовности ОГ КСр

$$G_{OG_KA}^j = \frac{\sum_{i=1}^n G_i^j}{n}, \quad (5)$$

при различных сценариях реализации стратегии сохранения статус-кво, опираясь на различия во внештатных ситуациях, возникающих в процессе эксплуатации ОГ КСр [10].

Рассмотрим пять моделей сценариев стратегии сохранения статус-кво.

Модель 1: работоспособное состояние ОГ КСр. Все штатные системы КСр работают в допустимых режимах $G_{OG_KA}^1$.

Модель 2: сбой в работе штатных систем КСр, переход на резерв, восстановление работоспособности, перезапуск работающих систем с НПУ. При использовании восстановления работоспособности после сбоя в работе штатных систем, переходов на резерв, и перезапуска работающих систем с НПУ средний совокупный коэффициент готовности ОГ КСр изменяется в меньшую сторону, это связано с тем, что перезагрузка системы не изменяет величину в сторону увеличе-

ния G_i , а переход на резервные комплектующие приводит к снижению надежности системы и как следствие уменьшению среднего коэффициента $G_{ог_ка}^2$ совокупной готовности ОГ КСр,

$$G_{ог_ка}^1 \geq G_{ог_ка}^2.$$

Модель 3: восстановление работоспособности ОГ КСр заменой КСр, возникающее при отказе, приводящем к выходу из строя КСр и/или исчерпании резервов КСр, это приводит к повышению коэффициента G_i совокупной готовности отдельного КСр и как следствие возрастает величина среднего коэффициента совокупной готовности ОГ КСр $G_{ог_ка}^3$. При этом необходимо отметить, что такая замена позволяет существенно сократить затраты времени на восстановление ОГ КСр, при этом восстановление резерва ОГ КСр потребует затрат на производство, запуск и вывод на орбиту нового дорогостоящего КСр $G_{ог_ка}^3 \geq G_{ог_ка}^2$.

Модель 4: восстановление и обслуживание КСр ОГ с помощью СИ при отказе оборудования КСр и (или) исчерпании его ресурсов, позволит в условиях временных и ресурсных ограничений поддерживать ОГ КСр в установленных степенях технической готовности и средний коэффициентом совокупной готовности ОГ КСр $G_{ог_ка}^4$ превышает величину $G_{ог_ка}^3$, получаемую при единичной замене КСр $G_{ог_ка}^4 \geq G_{ог_ка}^3$.

Модель 5: совмещение способов «замена КСр в ОГ КСр» и «восстановление и обслуживание КСр с помощью СИ», приводит к резкому увеличению значения среднего коэффициента $G_{ог_ка}^5$ совокупной готовности ОГ КСр, что позволит осуществить поддержку ОГ КСр в установленных степенях технической готовности при помощи замены КСр в ОГ КСр и предотвращения отказа других КСр с помощью СИ. В этом случае возрастают частные значения G_i нескольких КСр, при этом возникают затраты как в случае с $G_{ог_ка}^3$.

Таким образом, можно отметить следующую взаимосвязь коэффициентов

$$G_{ог_ка}^2 \leq G_{ог_ка}^1 \leq G_{ог_ка}^3 \leq G_{ог_ка}^4 \leq G_{ог_ка}^5,$$

полученную при оценке различных сценариев, возникающих в процессе эксплуатации ОГ КСр, при реализации стратегии сохранения статус-кво.

На основании рассчитанных коэффициентов совокупной готовности КСр G_i можно вычленив КСр из состава ОГ, требующие пристального наблюдения в связи с низким значением G_i

, а расчет средних значений коэффициента совокупной готовности ОГ КСр при реализации различных сценариев стратегии сохранения статус-кво, позволяет оценить затраты, возникающие при этом и осуществить обоснованный выбор сценария. Проведенные расчеты и обоснование выбора сценария стратегии будут способствовать поддержанию ОГ КСр в заданной степени технической готовности.

Библиографический список

1. Зелин А. Н. Наиболее значимые угрозы: роль воздушно-космической обороны в обеспечении национальной безопасности Российской Федерации // Независимое военное обозрение. URL: <http://nvo.ng.ru> (дата обращения: 16.12.2020).
2. Можяев Г. В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем: теоретико-групповой подход. М.: Машиностроение, 1989. С. 293.
3. Космическое пространство и его влияние на элементы конструкций космических аппаратов: электрон. метод. пособие к практ. работам / М-во образования и науки РФ; Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева; авт.-сост. Н. Д. Семкин, А. М. Телегин, М. П. Калаев. Самара, 2013.
4. Гуштин В. Н. Основы устройства космических аппаратов: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.
5. Езерский В. В., Кунтуров С. А. Анализ современных подходов к конструированию космических аппаратов // Научная сессия ГУАП: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2018. С. 72–77.
6. Сапего М. К., Тестоедов Н. А., Атамасов В. Д. и др. Теория проектирования сложных технических систем космического базирования: учебник. СПб.: КБ «Арсенал» им. М. В. Фрунзе; Балт. техн. ун-т «Военмех» им. Д. Ф. Устинова; СПб. отд-е Академии космонавтики РФ им. Циолковского; ИСС им. М. Ф. Решетнева, 2012. 570 с.
7. Кунтуров С. А., Кунтуров А. Л. Малые космические аппараты – современные средства дистанционного зондирования земли // Научная сессия ГУАП: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2018. С. 146–148.
8. Walker J. G. Some Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage // Journ. of the Br. Interplanetary Society. 1971. Vol. 24. P. 359–374.
9. Donder E. LEO radiation environment: impacts on PROBA // BIRA-IASB. Space Weather Section. Brussels. 2014. 31 March.
10. Кунтуров А. Л., Кунтуров С. А. Структурная схема программируемого диагностического способа оценки совокупного износа // Вестн. воздушно-косм. обороны. 2016. № 3 (11). С. 69–71.

УДК 629.73

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-206-210

В. В. Езерский*

доктор технических наук, профессор

А. А. Пляскина*

аспирант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УПРАВЛЕНИЯ БОКОВЫМ ТРАЕКТОРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО КРИТЕРИЮ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Рассмотрены вопросы построения оптимального управления движением летательного аппарата по критерию быстродействия управления при ограничениях на величину воздействия (угол крена) в условиях больших отклонений, описываемых нелинейной моделью бокового навигационного движения, с учетом постоянного бокового ветра. Вопросы построения оптимальной по критерию максимального быстродействия траектории летательного аппарата из точки фазового пространства, заданной координатами и курсовым углом, в другую точку рассмотрены в фундаментальной работе Л. Е. Дубинса [1]. Общие вопросы синтеза программного управления динамическими системами изложены в работах Ж. Атанса и П. Л. Фалба [2], В. Н. Афанасьева, В. Б. Колмановского, В. Р. Носова [3].

Ключевые слова: оптимальное управление движением ЛА, критерий быстродействия, функция управления.

V. V. Yezersky*

Dr. Sc., Tech., Professor

A. A. Plyaskina*

PhD Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ON THE ISSUE OF MATHEMATICAL MODELING OF THE LATERAL TRAJECTORY MOTION CONTROL OF THE AIRCRAFT BY THE CRITERION OF SPEED

Considered are the issues of constructing the optimal control of the movement of the aircraft according to the criterion of control speed under constraints on the magnitude of the impact (roll angle) under conditions of large deviations described by the nonlinear model of lateral navigation movement, taking into account the constant crosswind. The issues of constructing an aircraft trajectory, optimal by the criterion of maximum speed, from a point in the phase space, given by coordinates and a heading angle, to another point are considered in the fundamental work of L. Ye. Dubins [4]. General questions of the synthesis of programmed control of dynamic systems are presented in the works of Atans Zh. And Falba PL [5], Afanasyev VN, Kolmanovsky VB, Nosov VR [1].

Keywords: optimal control of aircraft motion, performance criterion, control function.

Введение

Современные условия эксплуатации комплексов управления летательным аппаратом (ЛА) требуют повышения точности, надежности и быстродействия функционирования. Одной из основных операций навигационного обеспечения как беспилотных, так и пилотируемых ЛА является выход на линию заданного пути (ЛЗП) и последующая стабилизация движения в требуемом направлении. В большинстве решений этой задачи компенсирование возникающих отклонений от заданного активного участка маршрута, как правило, выполняет-

ся с использованием «энергетического» критерия качества управления, при этом рассмотрение ограничивается линейной моделью движения ЛА [1, 2]. В практике летной эксплуатации ЛА при ограничении времени маневрирования актуальной является задача синтеза программного управления, обеспечивающего наибольшее быстродействие при выходе на ЛЗП.

Модель движения и особенности управления

Движение ЛА в боковом направлении относительно ЛЗП при траекторном маневрирова-

нии описывается системой двух нелинейных дифференциальных уравнений относительно переменных состояния Z и φ [2]:

$$\begin{aligned} \frac{dZ}{dt} &= V \cdot \sin \varphi + U_Z, \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{g}{V} \tan \gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

где Z – величина бокового отклонения от ЛЗП (положительное значение – вправо); t – время; φ – относительный угол курса (угол между направлением текущего курса ЛА и ЛЗП, положительное значение – вправо от ЛЗП), причем $|\varphi| \leq \pi/2$; V – воздушная скорость; U_Z – поперечная составляющая скорости ветра; γ – угол крена ЛА.

Заменой переменных

$$\frac{t \cdot g}{V} = \tau, \quad z = Z \cdot \frac{g}{V^2}, \quad u_z = \frac{U_Z}{V} \quad (2)$$

модель движения (1) сводится к нормированным уравнениям:

$$\frac{dz}{d\tau} = \sin \varphi + u_z, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \tan \gamma, \quad (3)$$

где z , φ – переменные состояния (нормированное боковое отклонение и относительный курс); u_z – параметр бокового ветра; γ – функция управления.

Задача траекторного навигационного управления боковым движением ЛА формулируется следующим образом. При заданном начальном значении бокового отклонения и угла курса

$$z(0) = z_0, \quad \varphi(0) = \varphi_0 \quad (4)$$

следует перевести ЛА на ЛЗП, при этом

$$z(\tau_k) = 0, \quad \varphi(\tau_k) = \delta, \quad (5)$$

где τ_k – длительность процесса управления (не фиксирована); δ – требуемый угол сноса на

ЛЗП, равный $\delta = a \sin u_z = a \sin \frac{U_Z}{V}$.

В качестве функции управления (управляющего воздействия) используется угол крена $\gamma(\tau)$, на который накладывается симметричное ограничение по величине

$$|\gamma(\tau)| \leq \gamma_0, \quad (6)$$

где γ_0 – максимальное значение угла крена, $\gamma_0 > 0$.

Оптимальное управление выбирается исходя из требования максимального быстродействия (минимальной длительности процесса), при этом

требование к функционалу качества управления формально может быть записано как

$$J(\gamma) = \int_0^{\tau_k} 1 d\tau = \tau_k \rightarrow \min. \quad (7)$$

При малых углах крена и курса поставленная задача представляет собой задачу оптимального управления по указанному критерию быстродействия системой, описываемой моделью двойного интегратора с постоянным внешним воздействием [4].

Гамильтониан задачи оптимального управления представляется как

$$H(z, \varphi, \psi_i, \gamma) = \psi_1 \sin \varphi + \psi_2 \tan \gamma - 1, \quad (8)$$

где ψ_1 , ψ_2 – сопряженные функции, являющиеся решениями сопряженной системы

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{d\tau} = -\frac{\partial H}{\partial z} = 0 \\ \frac{d\psi_2}{d\tau} = -\frac{\partial H}{\partial \varphi} = -\psi_1 \cos \varphi \end{cases}. \quad (9)$$

Применение принципа Л. С. Понтрягина позволяет установить вид функции управления $\gamma(\tau)$. Из условия максимума гамильтониана следует, что функция оптимального управления $\gamma(\tau)$ должна иметь кусочно-постоянный вид:

$$\gamma(\tau) = \gamma_0 \begin{cases} 1, & \text{если } \psi_2(\tau) > 0 \\ \in [-1, 1], & \text{если } \psi_2(\tau) = 0, \\ -1, & \text{если } \psi_2(\tau) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

или кратко

$$\gamma(\tau) = \gamma_0 \operatorname{sign} [\psi_2(\tau)]. \quad (10')$$

При больших отклонениях от ЛЗП задача вырождена в классическом смысле, когда на некотором интервале $\psi_2(\tau) = 0$ и

$$\frac{\partial H(z, \varphi, \psi_i, \gamma)}{\partial \gamma} = \psi_2 \frac{1}{\cos^2 \gamma} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 H(z, \varphi, \psi_i, \gamma)}{\partial \gamma^2} = \psi_2 \frac{2 \sin \gamma}{\cos^3 \gamma} = 0.$$

В этом вырожденном случае $\gamma(\tau) = 0$ и выражение функции управления (10) запишется как

$$\gamma(\tau) = \gamma_0 \begin{cases} 1, & \text{если } \psi_2(\tau) > 0 \\ 0, & \text{если } \psi_2(\tau) = 0. \\ -1, & \text{если } \psi_2(\tau) < 0 \end{cases} \quad (10'')$$

Из необходимых условий

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial H(z, \varphi, \psi_i, \gamma)}{\partial \gamma} = -\psi_1 \frac{\cos \varphi}{\cos^2 \gamma} = 0,$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \frac{\partial H(z, \varphi, \psi_i, \gamma)}{\partial \gamma} = 3\psi_1 \sin \varphi \frac{\tan \gamma}{\cos^2 \gamma} = 0$$

следует, что в вырожденном случае

$$\varphi = \pm \frac{\pi}{2}.$$

На этом основании свойства функции управления могут быть заданы следующим образом:

1) возможный вид функции оптимального управления $\gamma(\tau)$ содержит одну или две чередующиеся положительные и отрицательные ступени управления, с возможным участком свободного движения – отсутствия управления при $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, т. е. управление может переключаться

(включаться и выключаться) не более четырех раз, с учетом первоначального включения и финального выключения управления;

2) каждая ступень управления имеет «прямоугольную» форму с экстремальными значениями $\pm \gamma_0$;

3) число неизвестных моментов переключения ступеней равно двум (одна ступень с возможным участком свободного движения) или трем (две ступени с промежуточным участком свободного движения), соответственно, число неизвестных моментов переключения равно двум или трем.

Выражение функции управления $\gamma(\tau)$ для двух ступеней можно записать в общем случае как

$$\gamma(\tau) = \pm \gamma_0 H(\tau) \mp \gamma_0 H(\tau - \tau_1) \mp \gamma_0 H(\tau - \tau_2) \pm \gamma_0 H(\tau - \tau_k), \quad (11)$$

где $H(\tau)$ – функция Хэвисайда; τ_1 – момент выключения первой ступени управления; τ_2 – момент включения второй ступени управления; в частном случае отсутствия участка свободного движения $\tau_1 = \tau_2$.

Неизвестными являются моменты времени переключения ступеней τ_1, τ_2, τ_k .

Синтез оптимального управления

Как было указано ранее, при ограничении фазовой переменной $|\varphi| \leq \pi/2$ функция оптимального управления имеет не более двух участков свободного движения, а ступени управления чередуются. Также следует отметить, что моментом включения первой ступени управления является нулевой момент времени.

При одноступенчатом управлении изменение угла подхода начального значения φ до требуемого угла сноса δ получается интегрированием уравнения движения при соответствующей функции внешнего воздействия и имеет вид

$$\delta - \varphi = \pm \cos \gamma_0 \tau_k, \quad (12)$$

где φ – начальное значение угла подхода (при нулевом угле крена); τ_k – длительность процесса управления; знаки « \pm » соответствуют положительной или отрицательной ступени управления соответственно.

Изменение бокового отклонения от начального значения z до нуля представляется как

$$z = \pm \frac{\cos(\delta) - \cos(\varphi)}{\tan \gamma_0} \mp u_z \frac{\delta - \varphi}{\tan \gamma_0}. \quad (13)$$

Выражение (13) представляет собой фазовую линию начальных условий «чисто» одноступенчатого управления $\Gamma_{\pm} = \{(z, \varphi) | z(\varphi)\}$.

Линия, отделяющая области двухступенчатого управления без свободного движения и с участком свободного движения, представляет собой решение уравнения (3) с максимальным по модулю управлением при граничных условиях

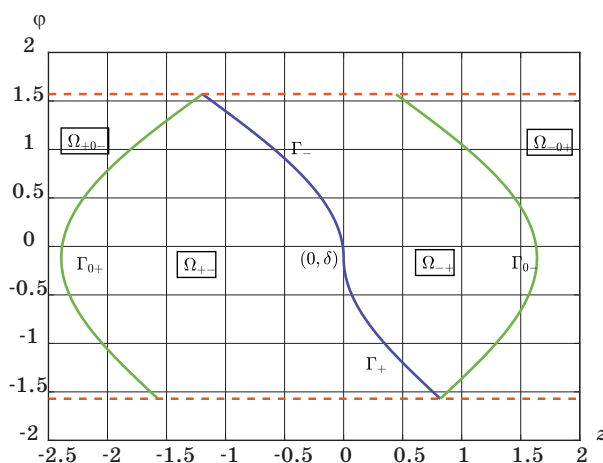
$$\varphi(\tau_1) = \pm \frac{\pi}{2}, \quad z(\tau_1) = z_{\mp}(\pm \frac{\pi}{2}), \quad (14)$$

где τ_1 – момент выключения первой ступени управления.

В результате фазовая линия разграничения $\Gamma_{0\pm} = \{(z, \varphi) | z(\varphi)\}$ представляется как

$$z = \mp \frac{\cos(\varphi) + \cos(\delta)}{\tan \gamma_0} \pm u_z \cdot \frac{\delta + \varphi \mp \pi}{\tan \gamma_0}. \quad (15)$$

Таким образом, на фазовой области (z, φ) выделяются 4 области начальных условий $\Omega_{-+}, \Omega_{+-}, \Omega_{-0}, \Omega_{+0}$, отделяемых линиями переключения $\Gamma_+, \Gamma_-, \Gamma_{0+}, \Gamma_{0-}$ формул (13), (15). На рисунке показаны области и линии переключения управления. В табл. 1 даны определения



Области и линии переключения управления на фазовой плоскости

Таблица 1

Области начальных условий

Обозначение	Тип управления	Определение области $\{(\varphi, z)\}$	Условия включения / выключения ступеней
Ω_{-+}	Отрицательная и положительная ступени $\{-1, +1\}$	$[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \times [z_+(\varphi), z_{0-}(\varphi)]$	Переключение ступеней: $(\varphi, z_+(\varphi))$
Ω_{-+}	Положительная и отрицательная ступени $\{+1, -1\}$	$(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \times [z_{0+}(\varphi), z_-(\varphi)]$	Переключение ступеней: $(\varphi, z_-(\varphi))$
Ω_{-0+}	Отрицательная и положительная ступени с участком свободного движения $\{-1, 0, +1\}$	$[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \times (z_{0-}(\varphi), \infty)$	Выключение первой ступени: $\varphi = -\frac{\pi}{2}$. Включение второй ступени: $(-\frac{\pi}{2}, z_+(-\frac{\pi}{2}))$
Ω_{+0-}	Положительная и отрицательная ступени с участком свободного движения $\{+1, 0, -1\}$	$(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}] \times (-\infty, z_{0+}(\varphi))$	Выключение первой ступени: $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Включение второй ступени: $(\frac{\pi}{2}, z_-(\frac{\pi}{2}))$

областей начальных условий и условия переключения ступеней управления.

Примеры синтеза управления

Рассмотрим примеры расчета управления при следующих параметрах модели движения:

воздушная скорость летательного аппарата $V = 600$ км/ч; поперечная составляющая скорости ветра $U_Z = 20$ м/с; максимальное значение крена γ_0 принято равным 45° ; требуемый угол сноса по окончании управления δ равен -7° . Нормированные безразмерные значения переменных выражаются как

Таблица 2

Примеры синтеза управления

Пример	Начальные условия	Тип управления	Характерные точки
1	$z = 1,$ $\varphi = 0$	$\{-1, +1\}$	Точка выключения первой ступени и включения второй: $\varphi_{\pm} = -1,20, z_{\pm} = 2,20$. Точка включения второй ступени: $\varphi_{+} = -1,06, z_{+} = 0,5$
2	$z = 3,$ $\varphi = 0$	$\{-1, 0, +1\}$	Точка выключения первой ступени: $\varphi_{-0} = -\frac{\pi}{2}, z_{-0} = 2,19$. Точка включения второй ступени: $\varphi_{+} = -\frac{\pi}{2}, z_{+} = 0,82$
3	$z = -1,$ $\varphi = 0$	$\{-1, +1\}$	Точка выключения первой ступени и включения второй: $\varphi_{-} = 0,91, z_{-} = -0,5$
4	$z = -4,$ $\varphi = 0$	$\{-1, 0, +1\}$	Точка выключения первой ступени: $\varphi_{+0} = \frac{\pi}{2}, z_{+0} = -2,81$. Точка включения второй ступени: $\varphi_{-} = \frac{\pi}{2}, z_{-0} = -1,20$

$$t \cdot 0,06 = \tau, \quad z = Z \cdot 0,35, \quad u_z = 0,12,$$

где переменная Z измеряется в километрах, а время t – в секундах.

На рис. 1 показаны области начальных условий и линий переключения ступеней управления на фазовой плоскости с координатами (z, φ) для указанных параметров.

Численные примеры при различных типах управления (начальных условий) представлены в табл. 2.

Заключение

Таким образом, представленный метод синтеза оптимального управления, основанный на переключении ступеней управления при достижении линий фазовой плоскости, может служить основой для решения многокритериальных задач оптимального управления движением, в частности, при использовании учитывающих «расход» ресурсов гибридных критериев оптимальности. С точки зрения практического применения, предложенный алгоритм мо-

жет быть использован в составе многометодных комплексов пилотажно-навигационного обеспечения летательных аппаратов.

Библиографический список

1. Dubins L. E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents // Am. J. of Math. № 79 (3). P. 497–516. Doi: 10.2307/2372560.
2. Атанс Ж., Фалб П. Л. Оптимальное управление. М.: Машиностроение, 1968. 764 с.
3. Афанасьев В. Н., Колмановский В. Б., Носов В. Р. Математическая теория конструирования систем управления. М.: Высшая школа, 2003. 614 с.
4. Козарук В. В., Ребо Я. Ю. Навигационные эргатические комплексы самолетов. М.: Машиностроение, 1986. 288 с.
5. Баранов В. Н., Зо Лин У. Решение задачи оптимального управления пространственным движением легкого самолета на основе принципа максимума Понтрягина // Труды МАИ: электрон. журн. 2011. Вып. 46.

УДК 629.78

Е. А. Королев*

магистрант

А. С. Кошкарлов*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ МЕЖСРЕДНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В КИТАЕ

Активное развитие частной космонавтики сделало актуальным вопросы многоразовых средств вывода малых и сверхмалых космических аппаратов. Одним из перспективных направлений для реализации этого направления являются межсредные летательные аппараты многоразового использования. Несмотря на явный успех в настоящий момент времени только космической программы НАСА остальные страны также делают шаги в этом направлении. Рассмотрены исторически предпосылки возникновения межсредных летательных аппаратов собственной разработки в Китае. Этапы их развития, современное состояние, а также основные анонсированные проекты.

Ключевые слова: космопланы, межсредные космические летательные аппараты, космическая программа КНР, малые космические аппараты.

E. A. Korolyev*

Postgraduate Student

A. S. Koshkarov*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ANALYSIS OF THE WORK STATUS OF SPACEPLANES CONSTRUCTION IN CHINA

Active development of private cosmonautics made the issues of reusable means of small and ultra-small spacecraft withdrawal urgent. One of the promising directions for realization of this direction is intermodal reusable spacecraft. Despite the evident success of NASA space program only, other countries are also making steps in this direction. Historically, the prerequisites for the emergence of intermodal aircraft of its own design in China have been considered. The stages of their development, current status and the main announced projects.

Keywords: space plans, intermodal spacecraft, Chinese space program, small spacecraft

Основываясь на опыте эксплуатации космических челноков «Спейс Шаттл» (США), в 1980-х гг. руководство НАСА прорабатывало вопросы на создания системы многоразовой системы выведения «легких» низкоорбитальных космических аппаратов (до 500 и до 2000 кг) с повышенной готовностью к пуску (условие оперативности: время ожидания запуска сокращается от 1–10 месяцев до 1 недели), с обеспечением условия всеизамуатальности и возможности выхода в заданный район пуска возвращаемой нижней ступенью (определенная гибкость операции) при условии горизонтального старта и обеспечения посадки нижней ступени. Данные работы нашли свое развитие в межсредных летательных аппаратах способных долговременно пребывать на орбите в беспилотном режиме и совершать многократные входы в плотные слои атмосферы с аэродинамическим маневром, например, в интересах из-

менения наклона плоскости орбиты. Самым ярким представителем этого класса, безусловно, является челнок проекта X-37 (масса аппарата до 5,4 т, при массе полезной нагрузки от 0,5 до 1 т) разработки корпорации *Boeing*. Однако и другие космические державы не отстают в представлении проектов таких аппаратов и проведении опытно конструкторских работ по ним. Таким образом, рассмотрение состояния вопроса развития проектов межсредных летательных аппаратов Китая и Европейского космического агентства является актуальным.

В истории развития программы межсредных летательных аппаратов Китая можно выделить три основных этапа, совпадающие больше с политической волей руководства, чем с развитием и возможностями промышленности.

Амбиции Китая в области межсредных летательных аппаратов, начались с возвращения

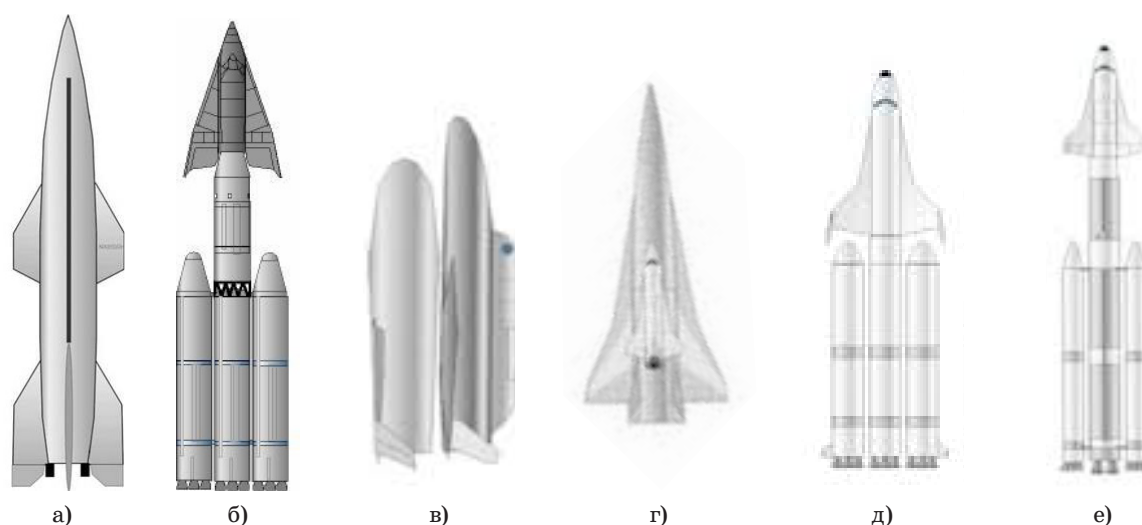


Рис. 1. Предполагаемый внешний вид прототипов космических самолетов, закрытых к разработке в настоящее время: а – Tsien 1949; б – Tsien 1978; в – Project 863 V-2; г – Project 863 «H-2»; д – Project 863 «Chang Cheng-1»; е – Project 863 «Tian Jiao-1»

в начале 50-х гг. прошлого века из США китайских ученых работавших в аэрокосмической отрасли совместно с вывезенными немецкими специалистами [1, 2]. Руководил этой группой из них является Цянь (Tsien) Сюэсен – один из основателей Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института. В 1949 г. Цянь представил доклад, в котором он предложил космический самолет для перевозки пассажиров, концепция, которая вдохновила американские программы аэрокосмических космических самолетов, которые в конечном итоге привели к созданию космического шаттла. Представленный космоплан предполагал одноступенчатый вывод на орбиту и горизонтальную посадку. В конце 1970-х гг. китайской аэрокосмической промышленностью был представлен второй концепт космоплана под руководством Цяня, аналогичный по конфигурации американской программе космических самолетов *Dyna-Soar*. Все концепты космопланов, предложенные на первом этапе становления китайской программы межсредних летательных аппаратов остались только на бумаге, так объективно на тот момент технологической возможностью развить такие программы имели только США и впоследствии СССР.

Следующий исторический этап развития Китайской программы межсредних летательных аппаратов связан с комплексом научно-исследовательских и конструкторских работ под названием «Проект 863» (рис. 1, г–е). В нем, в частности, развивалась подпрограмма «Проект 863-

204», направленная на разработку национального возвращаемого пилотируемого космического корабля по типу космоплана. Отдельно разрабатывались в рамках работ под общим названием «Проект 869» концепции беспилотных космических самолетов научного и двойного назначения. Судя по имеющимся изображениям и документальным данным, сильное влияние на облик и подходы в этой программе оказали французские разработчики со своим проектом космоплана *Hermes*. К 1989 г. идея разработки космического самолета проигрывает ракетному *Shenzhou* (созданному по типу Российских кораблей «Союз» в рамках комплекса научно-исследовательских работ «Проект 9213») из-за более высокого риска отсутствия результатов работ и высоких затрат. Также на свертывание программы повлияла катастрофа космического челнока *Challenger*. Однако широкий фронт работ позволил создать научно-технический задел для перехода к третьему современному этапу развития межсредних космических аппаратов в аэрокосмической отрасли Китая.

Современный этап развития межсредних летательных аппаратов целиком направлен на копирование американских демонстрационных технологий. Его началом принято считать выступление на конференции «IAC-2006» (г. Валенсия) [3] представителей Китайской академии ракет-носителей (CALT), где они представили доклад о двух рассматриваемых концепциях многоцелевого космического самолета: 130-тонный или пилотируемый космический самолет для операций

Таблица 1

Тактико-технические данные по межсредным летательным аппаратам КНР

Летательный аппарат	Кол-во ступеней	Тип старта	Тип посадки	Возврат	Разработчик	Предполагаемая нагрузка
<i>Tsien 1949</i>	1	Верт.	Гориз.	Полная	–	Экипаж до 10 человек
<i>Tsien 1978</i>	2	Верт.	Гориз.	Только 2 ступень	–	Экипаж 2 человека
<i>Project 863 «V-2»</i>	2	Верт.	Верт.	Полная	Китайская аэрокосмическая научно-техническая корпорация (CASC)	–
<i>Project 863 «H-2»</i>	2	Верт.	Гориз.	Полная	Шэньянский институт проектирования самолетов (601 Institute)	Полезная нагрузка: до 6 НКА
<i>Project 863 «Chinese Hermes»</i>	2	Верт.	Гориз.	Только 2 ступень	Китайская авиационная промышленная корпорация (AVIC)	Экипаж 3 человека и до 3 НКА
<i>Project 863 «Chang Cheng-1»</i>	2	Верт.	Гориз.	Только 2 ступень	Шанхайская академия космических технологий (SAST)	Полезная нагрузка: до 5 НКА
<i>Project 863 «Tian Jiao-1»</i>	2	Верт.	Гориз.	Только 2 ступень	Китайская академия технологий ракет-носителей (CALT)	Полезная нагрузка: до 3 НКА
<i>Shenlong</i>	–	Самолет	Гориз.	Полная	Китайская авиационная промышленная корпорация (AVIC)	Беспилотный
<i>Tengyun</i>	–	Гориз.	Гориз.	Полная	Китайская корпорация аэрокосмической науки и промышленности (CASIC)	Беспилотный
<i>Tianxing-1, 2 и 3</i>	–	Верт.	Гориз.	Полная	Частная компания Space Transportation Co.	Беспилотный
<i>Suborbital Concept Vehicle</i>	2	Верт.	Гориз.	Полная	Частная компания iSpace	Космический туризм

на низкой околоземной орбите и 100-тонный беспилотный суборбитальный космический самолет для запуска полезных грузов.

Обе концепции привязаны к использованию в качестве первой ступени тяжелой ракеты-носителя *Long March-5*. В это же период времени относится первое упоминание о воздушных пусках межсредного летательного аппарата *Shenlong* с самолета-носителя *H-6K* (рис. 2).

Судя по доступным данным, это технологическая испытательная платформа, аналогичная американскому аппарату *Boeing X-37B*. Предполагается, что в конце 2010 или начале 2011 г. Китай провел суборбитальные испытания аппарата *Shenlong* [4].

Наиболее современным проектом межсредного летательного аппарата является разработка Китайской корпорации аэрокосмической науки и промышленности *Tengyun*. Это полностью многоразовый аэрокосмический самолет, основанный на двухэтапном выходе на орбиту

с горизонтальным взлетом и горизонтальной посадкой.

Его двигательные установки потенциально будут мирового класса: турбина с комбиниро-



Рис. 2. Единственная официальная фотография *Shenlong*, подвешенного в качестве внешней нагрузки к бомбардировщику *H-6K*, предположительно, для воздушного старта

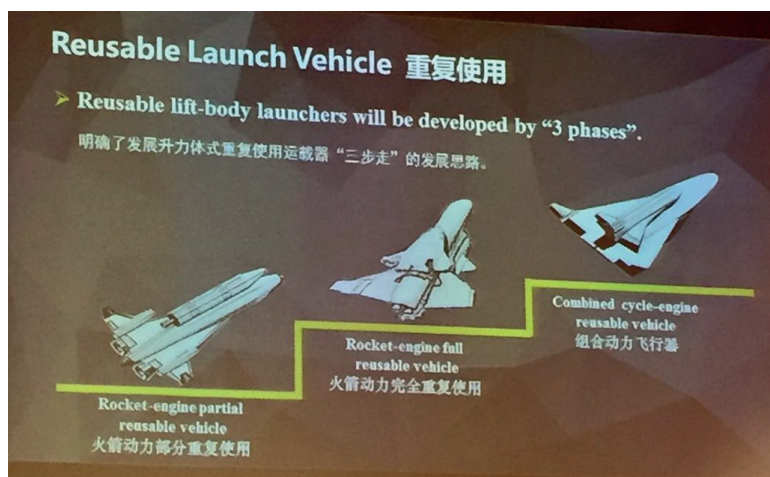


Рис. 3. Фото с официальной презентации корпорации China Aerospace Science and Technology Corporation, демонстрирующее три запланированных этапа: 1 – многоразовый ракетоплан; 2 – многоразовый ракетоплан и межсредный летательный аппарат Tengyun; 3 – гиперзвуковой самолет-носитель с газотурбинным ракетным двигателем и межсредный летательный аппарат Tengyun

ванным циклом для 1-й ступени и более классическая ракета для второй ступени. Обе ступени являются многоразовыми и вернутся на землю путем выполнения горизонтальной посадки. Разработка новых технологий, таких как силовая установка ТВСС, планируется завершить в 2025 г., а первый полет – в 2030 г. Общая концепция развития по видению самой корпорации представлена на фото с официальной презентации (рис. 3).

Оставшиеся два представителя китайских разработок в области межсредных летательных аппаратов являются частными разработками, что говорит о наличии политики доступа част-

ного капитала к чувствительной сфере комических и двойных разработок.

Космические самолеты *Tianxing*-1, 2 и 3, которые в настоящее время разрабатывает частная китайская стартап-компания *Space Transportation Co.* (основана в 2018 г.). Хотя о семействе *Tianxing* было раскрыто очень мало информации, на корпоративном веб-сайте компании упоминается, что *Tianxing* 1 и 2 будут суборбитальными аппаратами, предназначенными для гиперзвуковых научных экспериментов, а *Tianxing* 3 будет небольшим орбитальным аппаратом, способным доставлять полезный груз на низкую околоземную орбиту.



Рис. 4. Предполагаемый внешний вид перспективных прототипов космических самолетов: а – *Tianxing*-1; б – *Tianxing*-4; в – *Suborbital Concept Vehicle*

Проект *Suborbital Concept Vehicle* компании *iSpace* ориентирован на космический туризм и даже точечным перевозкам пассажиров («Шанхай – Лос-Анджелес за 39 минут»). Хотя на данном этапе этот аппарат является только концепцией, компания обещает проработку до опытного экземпляра.

В завершение необходимо отметить, что анализ и оценка тактико-технических характеристик китайских образцов космической техники крайне затруднена из-за четкого контроля внутренних интернет-ресурсов. Поэтому большинство информации получено из официальных сообщений корпораций и корпоративных сайтов. Поэтому даже сообщения новостного агентства Синьхуа [5, 6] о том, что китайский многоразовый экспериментальный космический корабль успешно приземлился на заданной площадке спустя два дня полета в сентябре 2020 г., остается без кадров запуска носителя или его посадки. Однако по типу ракеты носителя двухступенчатая ракета-носитель среднего класса *Chang Zheng-2F* можно предположить, что орбитальный вариант модернизированного *Shenlong* все-таки отправился в космос и произвел посадку горизонтального типа на подготовленный аэродром. Таким образом, можно отметить устойчивую тенденцию к созданию межсредних летательных аппаратов как возвращаемых верхних ступеней ракет-носителей с «легкой» полезной нагрузкой. Такой вариант построения космической многоразовой системы позволяет частично решить проблему полей падения верхних ступе-

ней ракеты-носителя, сократить уровень засорения низкой околоземной орбиты и обеспечивает спасение аппарата с полезной нагрузкой в случае аварии ракеты-носителя на участке выведения).

Библиографический список

1. Ричард Фишер Младший. Китайская космическая программа // China's Space Plane Program. IASC Web Page. 2011. 27 July. URL: http://www.strategycenter.net/research/pubID.253/pub_detail.asp (дата обращения: 30.11.2020).
2. Rana L., Chudoba B. Design Evolution and AHP-based Historiography of Lifting Reentry Vehicle Space Programs // AIAA SPACE. 2016. Doi: 10.2514/6.2016-5319.
3. Yong Yang, Defeng Hu, Menglun Yu. Roadmap of long-march reusable launch vehicle // 57th International Astronautical Congress. Valencia, Spain, 2006. 2–6 Oct.
4. Стивен Кларк. Китай испытал окутанный тайной экспериментальный многоразовый космический корабль. URL: <https://spaceflightnow.com/2020/09/08/china-completes-test-flight-of-experimental-reusable-spacecraft/> (дата обращения: 30.11.2020).
5. Сообщения новостного агентства Синьхуа. URL: http://www.xinhuanet.com/english/2020-09/04/c_139342598.htm (дата обращения: 30.11.2020).
6. Сообщения новостного агентства Синьхуа. URL: http://www.xinhuanet.com/english/2020-09/06/c_139346803.htm (дата обращения: 30.11.2020).

УДК 614.88

М. С. Лебедева*

магистрант

С. Ф. Скорина*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ДВУХОСНЫЙ ГИРОСТАБИЛИЗАТОР ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ПОСТРАДАВШЕГО ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ

Рассмотрен вопрос модернизации медицинских средств транспортной иммобилизации в целях уменьшения летальности на догоспитальном этапе оказания медицинской помощи пострадавшим. Решение основывается на применении принципов гироскопической стабилизации.

Ключевые слова: транспортная иммобилизация, система гироскопической стабилизации, математическая модель.

M. S. Lebedeva*

Postgraduate Student

S. F. Skorina*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DUAL-AXIS GYROSTABILIZER FOR IMMOBILIZATION OF INJURED DURING TRANSPORTATION

The article describes the problem of modernization of medical means of transport immobilization in order to reduce mortality at the pre-hospital stage of providing medical care to injured. The solution is based on applying the principles of gyroscopic stabilization.

Keywords: transport immobilization, gyroscopic stabilization system, mathematical model.

Введение

В современных условиях, при чрезвычайных ситуациях, авариях и несчастных случаях первая врачебная помощь всегда осуществляется уже на этапах транспортировки пострадавших. Основными причинами гибели людей на догоспитальном этапе являются кровопотеря и множественные повреждения внутренних органов. Поэтому необходимость транспортной иммобилизации является актуальным вопросом на протяжении долгого периода времени в связи с риском возникновения осложнений, новых очагов кровотечения, асфиксии, повреждении нервов и сосудов, угрожающих жизни пострадавшего.

Одним из основных показателей качества работы скорой медицинской помощи (СМП) является время доезда до пациента. За 2014–2018 гг. этот показатель в Санкт-Петербурге характеризуется тенденцией к снижению, о чем свидетельствуют данные Департамента мониторинга, анализа и стратегического развития здравоохранения [1].

С другой стороны, зафиксировано существенное увеличение числа умерших непосред-

ственно в автомобиле скорой помощи – 226 человек на момент 2018 г. при 160 в 2014 г. Из чего можно заключить, что сложившаяся система технологии работы СМП все еще не обеспечивает необходимую эффективность и нуждается в модернизации используемого оборудования. В частности, средств иммобилизации пострадавшего, которые должны обеспечить его пространственную неподвижность во время транспортировки.

Требования к стандартному оснащению выездных общепрофильных бригад СМП подробно перечислены в Приказе Министерства здравоохранения Российской Федерации от 22 января 2016 г. № 33н [2].

Целью статьи является усовершенствование средства транспортной иммобилизации на базе оценки потенциальной возможности и перспективности использования для решения указанной задачи принципов гироскопической стабилизации. Для этого предполагается оценить динамические характеристики гиростабилизатора путем исследования его математической модели.

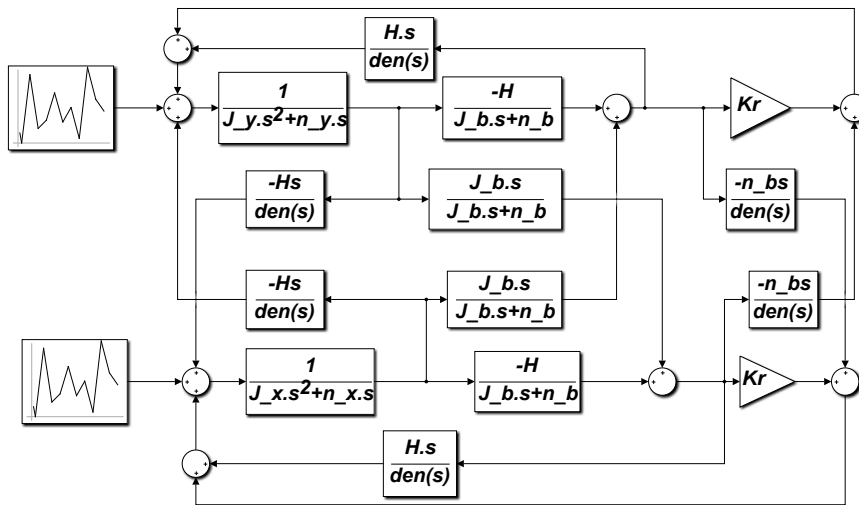


Рис. 1. Структурная схема двухосного гиросtabilизатора

Математическая модель двухосного гироскопического стабилизатора

Математическая модель двухосного гиросtabilизатора (ДГС) известна [3] и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} J_Y s^2 \alpha_1 - H s (\theta_1 \mp \alpha_2) &= -\mu_Y s \alpha_1 + k_P \theta_1 - \mu_B s \theta_2 + m_Y; \\ J_X s^2 \alpha_2 - H s (\theta_2 - \alpha_1) &= -\mu_X s \alpha_2 + k_P \theta_2 \mp \mu_B s \theta_1 + m_X; \\ J_B s^2 (\theta_1 \mp \alpha_2) + H s \alpha_1 &= -\mu_B s \theta_1; \\ J_B s^2 (\theta_2 - \alpha_1) + H s \alpha_2 &= -\mu_B s \theta_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где J_Y, J_X, J_B – приведенные к осям стабилизации моменты инерции платформы и гироскопа; α_1, α_2 – углы абсолютного поворота платформы вокруг одной из осей стабилизации; θ_1, θ_2 – относительные углы поворота гироскопа вокруг оси прецессии; H – кинетический момент гироскопа; m_Y, m_X – внешние возмущающие моменты; μ_Y, μ_X, μ_B – приведенные к осям стабилизации коэффициенты моментов сил вязкого трения. Структурная схема ДГС, используемая для анализа динамических характеристик по результатам моделирования в среде MatLAB, приведена на рис. 1.

Возможные варианты практической реализации конструктивной схемы ДГС, принцип его работы и методика получения уравнений (1) рассмотрены в работах [3–5].

Результаты моделирования

При моделировании рассматривалось два варианта конструктивной схемы ДГС. В первом варианте анализировались характеристики ДГС

в классическом исполнении, когда платформа с пострадавшим соединена с корпусом транспортного средства посредством дополнительного кольца. Конструктивное оформление платформы представлено в работе [6]. Во втором варианте была использована обращенная схема карданова подвеса. Последний вариант обеспечивает возможность существенного уменьшения моментов инерции подвеса, что в соответствии с теорией положительным образом сказалось на динамических характеристиках ДГС. Приведенные ниже результаты относятся к варианту использования обращенного подвеса платформы с пострадавшим.

В ходе имитационного моделирования с помощью полученных логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛАЧХ и

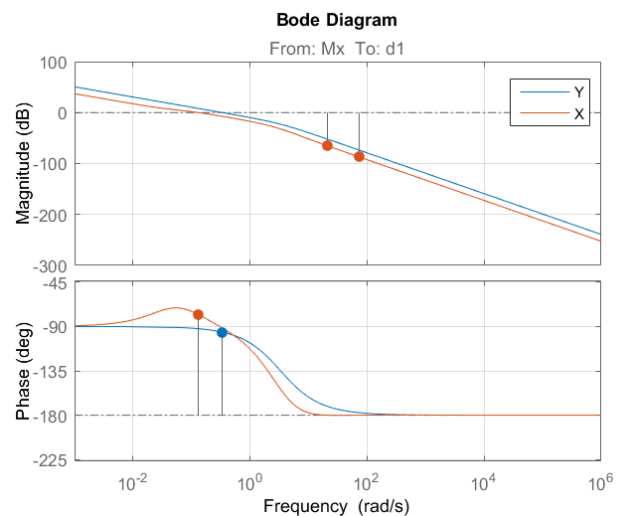


Рис. 2. ЛАЧХ и ЛФЧХ системы гиросtabilизатора

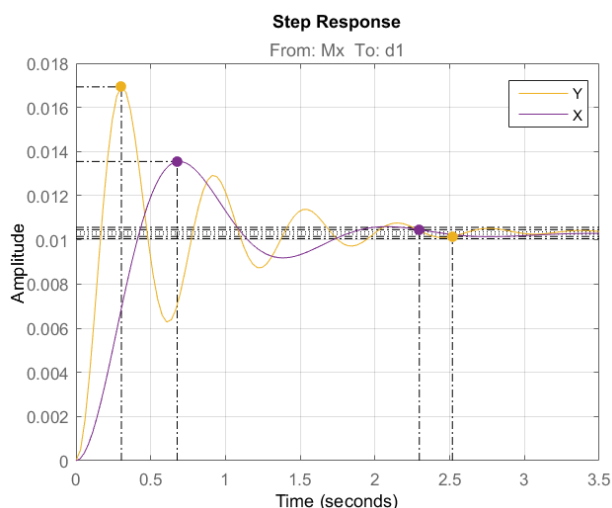


Рис. 3. Переходный процесс

ЛФЧХ) была оценена устойчивость предлагаемой системы иммобилизации с учетом усредненных массо-габаритных характеристик пострадавшего. Вес и рост последнего предполагался равным 80 кг и 180 см. Система гироскопической стабилизации оказалась устойчивой. Запас по фазе составил $84,3^\circ$ для продольного и 102° для поперечных горизонтальных каналов соответственно. Вид ЛАЧХ и ЛФЧХ приведен на рис. 2.

Реакция ДГС в виде переходных процессов в каналах стабилизации на случайное входное воздействие приведена на рис. 3. Перерегулирование составляет 63,4 и 32,1% для продольного и поперечного каналов соответственно. Длительность переходных процессов в каналах стабилизации не превышает 2,3–2,5 с.

Заключение

Проведенное моделирование подтверждает справедливость предположения о возможности

и целесообразности использования для повышения эффективности иммобилизации пострадавшего принципов гироскопической стабилизации. Разработка пилотного проекта соответствующего устройства требует проведения комплекса имитационных моделирований поведения ДГС с учетом условий его применения в реалиях современной действительности. В частности, с учетом состояния автомобильных дорог Российской Федерации, расположенных за пределами мегаполисов.

Библиографический список

1. Департамент мониторинга, анализа и стратегического развития здравоохранения. Статистические материалы. URL: <https://www.rosminzdrav.ru/ministry/61/22/stranitsa-979/statisticheskie-i-informatsionnye-materialy/statisticheskie-materialy> (дата обращения: 05.12.2020)
2. Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 22 января 2016 года № 33н «Об утверждении Порядка оказания скорой, в том числе скорой специализированной, медицинской помощи». URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71248624/> (дата обращения: 05.12.2020).
3. Пельпор Д. С. Гироскопические системы ориентации и стабилизации: справ. пособие. М.: Машиностроение, 1982. 165 с.
4. Северов Л. А. Механика гироскопических систем: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 1996. 212 с.
5. Бесекерский В. А., Фабрикант Е. А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. Л., 1968. 348 с.
6. Лебедева М. С., Семенова В. П., Скорина С. Ф. Модернизация средств транспортировки пострадавшего // 73-я Международ. студ. науч. конф. ГУАП: сб. докл.: в 5 ч. Ч. 1: Техн. науки. СПб.: ГУАП, 2020. С. 174–176.

УДК 62-03

И. Е. Лезова*

ассистент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ВЕЩЕСТВА В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Представлен обзор современных исследований полимерных и композитных материалов с целью демонстрации перспективы их практического применения. Обзор представляет собой краткую справочную информацию об исследованиях, проведенных в области нанокompозитов на основе эпоксидной глины, стеклянных армирующих наполнителей и термопластично-модифицированных эпоксидных систем. Дано представление о структуре и строении эпоксидных смол. Часть обзора посвящена исследованию свойств поверхности с использованием фторполимера.

Ключевые слова: полимер, эпоксидные смолы, фторполимер.

I. E. Lezova*

Assistant

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN THE AVIATION INDUSTRY

The paper presents an overview of modern research on polymer and composite materials in order to demonstrate the prospects for their practical application. The review is brief background information on research carried out in the field of nanocomposites based on epoxy clay, glass reinforcing fillers, and thermoplastic-modified epoxy systems. An idea of the structure and structure of epoxy resins is given. Part of the review is devoted to the study of surface properties using a fluoropolymer.

Keywords: polymer, epoxy resins, fluoropolymer

Введение

Полимерами называют высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся: химически идентичных звеньев – мономеров. Наиболее широко применяемыми синтетическими примерами являются – полиэтилен. Он является продуктом полимеризации этилена, углеводорода с двойной связью, легко вступающий в реакции присоединения при ее раскрытии (рис. 1, а) [1].

Материалы на основе полимеров способны претерпевать большие обратимые деформации. Полимеры не подвержены коррозионному воздействию, некоторые из них способны противостоять агрессивным средам. Полимерные материалы могут быть сформированы, что называется: по месту их применения, им не требуется дополнительная выплавка и закалка. Данный спектр полезных свойств открывает широкие перспективы их практического применения.

Формирование композиций, на основе органических полимеров и неорганических наполнителей позволяет расширять спектр полезных свойств таких материалов. Композицион-

ные материалы на основе стеклянных армирующих наполнителей и полимерных связующих (матриц) впервые в были разработаны научной группой Всероссийского института авиационных материалов в 1945 г. [2].

Примером таких материалов являются-эпоксидный стеклопластик марки СТ-69Н(М) [3]. Данный состав может быть использован для формирования средненагруженных элементов внешнего контура летательных аппаратов. Кроме того его можно использовать для формовки обтекателей РЛС, створок шасси и грузовых отсеков. Для производства облицовки трехслойных панелей, люков, дверей, створ используют-ся композиты из эпоксидных смол марки ВПС-33 и ВПС-34 [4].

Композитные материалы на основе полимеров

Эпоксидные смолы представляют собой материалы с выдающимися механическими свойствами, высокой прочностью сцепления, хорошей термостойкостью и высоким электрическим сопротивлением. Они имеют широкий

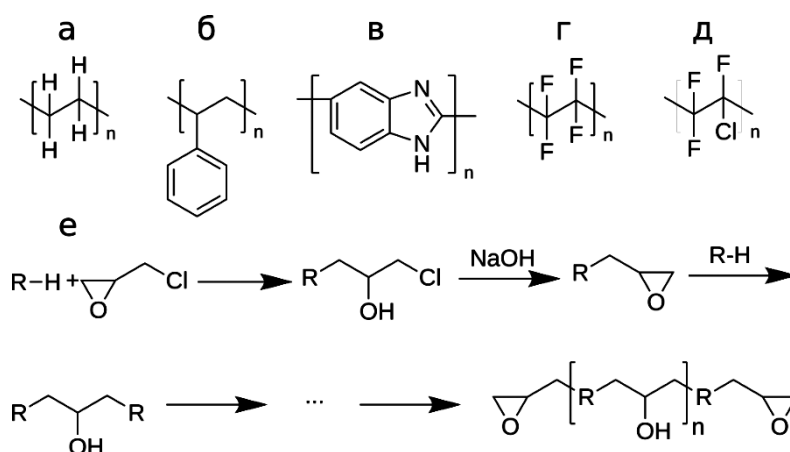


Рис. 1. Химические структуры: полиэтилена (а), полистирола (б), полибензоимидазола (в), политетрафторэтилена (г), политетрафторхлорэтилена (д) и схема синтеза материалов на основе эпоксидных смол

спектр применения, включая покрытия, аэрокосмическую промышленность, электронные материалы и биомедицинские системы.

Эпоксидными смолами называют составы с олигомерами содержащими одну или несколько эпоксидных групп на молекулу. Олигомер это полимер с низкой степенью полимеризации и низким молекулярным весом [1]. Окончательные свойства отвержденных эпоксидных смол зависят от типа эпоксидной смолы, отвердителя и процесса отверждения (рис. 1, е).

Отвердители, используемые для отверждения при комнатной температуре, обычно представляют собой алифатические амины, а для высокой температуры используются ароматические амины и ангидриды кислот. Полифункциональные амины, многоосновные карбоновые кислоты и неорганические отвердители также используются в качестве специализированных отвердителей [5]. В целом системы смол, отвержденных при высокой температуре, обладают улучшенными свойствами, такими как более высокая температура стеклования, прочность и жесткость, по сравнению с системами, отвержденными при комнатной температуре [6]. Включение термопластических компонентов, неорганических веществ, углеродных волокон, глины и углеродных нанотрубок так увеличивают прочность эпоксидных смол [7].

Наноккомпозиты на основе глины представляют собой водные силикаты или алюмосиликаты и в основном содержат кремний, алюминий или магний, кислород и гидроксил с различными связанными катионами. Эти ионы и группы OH организованы в двумерные структуры в виде листов. Глинистые минералы также называют слоистыми силикатами или фило-

силикатами, потому что их структурный каркас в основном состоит из силикатных слоев толщиной порядка 1 нм.

В зависимости от природы компонентов, условий обработки и силы межфазных взаимодействий между полимером и слоистыми силикатами (модифицированными или немодифицированными) могут быть сформированы либо обычные композиты, либо наноккомпозиты [8]. В обычном композите полимер не может диффундировать между слоями глины, и частицы глины существуют в своем первоначальном агрегированном состоянии. Свойства этих композитов аналогичны композитам, которые наполнены микрочастицами. Структуру композитов и толщины слоев глины в полимерной матрице можно определить с помощью методов дифракции рентгеновских лучей и просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ).

Согласно литературным данным, полимерные материалы на основе эпоксидной глины демонстрируют улучшенные термомеханические свойства даже при небольшом количестве слоистого силиката ($\leq 5\%$). Таким материалы имеют повышенную прочность, термостойкость, пониженную газопроницаемость, пониженный коэффициент теплового расширения и пониженную воспламеняемость. Основной причиной этого улучшенного свойства наноккомпозитов является большое межфазное взаимодействие между полимерной матрицей и слоистым силикатом, а также высокое соотношение сторон диспергированных частиц глины [5].

Для изготовления конструкционных клеев в аэрокосмической промышленности широко используются термопластично-модифицированные эпоксидные системы ввиду их высоких

адгезионных свойств и низкой стоимости. Данные системы обычно получают путем индуцированного полимеризацией фазового разделения термопластичного модификатора, который первоначально смешивается с эпоксидной смолой, но разделяется на фазы в процессе полимеризации. Конечные свойства систем определяются результирующей фазово-разделенной морфологией, и эффективное улучшение вязкости будет получено только при со-непрерывной фазовой или фазово-инверсионной структуре [9].

Помимо эпоксидных смол в авиации используются композиции на основе полибензимидазола (рис. 1, в). Находят свое применение композиции на основе карбонизованных полимеров, содержащие асбестовые и углеродные волокна и выдерживающие температуры 800 °C и выше, такие структуры используются для изготовления тормозных дисков на авиационных колесах [9].

Фторполимеры

В современной научной литературе много уделяется вниманию технологии нанесения покрытия. Изучаются химические методы и подходы к повышению эффективности органических покрытий с минимальным содержанием летучих органических компонентов. Типичные коррозионностойкие покрытия защищают металлические поверхности главным образом за счет двух механизмов. Первый механизм действует как физический барьер для изоляции подложки от агрессивной среды, второй механизм работает за счет содержания реактивных материалов, которые взаимодействуют с компонентом транспортного средства и препятствуют коррозии [10]. Постоянно растущий спрос на краски, обеспечивающие долговечность на открытом воздухе и высокую стойкость к агрессивным средам, привел к постоянным разработкам фторполимерных покрытий с интересными объемными и поверхностными свойствами.

Фторсодержащие полимерные материалы демонстрируют уникальные комбинации свойств, такие как низкая поверхностная энергия; низкий коэффициент трения; хорошая стойкость к агрессивным химическим веществам; низкая проницаемость для воды (коэффициент влагопроницаемости политетрафторэтилена на два порядка, а политетрафторхлорэтилена на три порядка ниже, чем у полистирола) низкая растворимость в полярных и неполярных органических растворителях (рис. 1, г, д). Они также обладают замечательной устойчивостью к пламени, ультрафиолетовому излучению, загрязняющим

веществам. Политетрафторэтилен может возгораться при 95%-м содержании кислорода в азотно-кислородной смеси, тогда как полиэтилену и полистиролу достаточно 17,4% [9, 10].

Благодаря антиадгезионным и антифрикционным свойствам материалы и изделия из фторполимеров применяются в авиационной технике в узлах трения, которые могут работать без смазки [11]. Введение фтора в основную цепь полимера или его боковые цепи – это хорошо известные методы, которые приводят к большим изменениям свойств поверхности. Это связано с сегрегацией фторированных цепей к границе раздела полимер – воздух, что приводит к значительному снижению поверхностной энергии.

В работах Хо и Винн [12] и Ханичак и др. [13] описаны способы приготовления фторированных полиуретанов для получения поверхностей с минимальной адгезией. Функциональные перфторполиэфиры (PFPE) известны как промежуточные продукты для получения покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками [14].

Внешние поверхности различных летательных аппаратов, в процессе эксплуатации подвержены интенсивной эрозии. Активные поиски эрозионностойких, морозостойких лакокрасочных покрытий является актуальной задачей в авиационной промышленности.

Заключение

Настоящий обзор наглядно демонстрирует одну из важных ролей, которую играют полимерные композитные материалы и изделия из них в авиационной технике. Ясно, что функциональные свойства композитных материалов имеют очень большую перспективу обширного применения в авиационной и других высокотехнологичных отраслях промышленности.

Библиографический список

1. Тагер А. А. Физико-химия полимеров. М.: Химия, 1989. 536 с.
2. Аврасин Я. Д., Бородин М. Я., Киселев Б. А. Стеклопластики в авиационной технике // Авиационная промышленность. 1982. № 8. С. 80–84.
3. Курносов А. О., Мельников Д. А., Соколов И. И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиационной техники // Труды ВИАМ: электрон. науч. журн. 2015. № 8.
4. Давыдова И. Ф., Кавун Н. С. Стеклопластики в конструкциях авиационной и ракетной техники // Стекло и керамика. 2012. № 4. С. 1–7.

5. Epoxy clay nanocomposites – processing, properties and applications: A review / A. A. Azeez, Yop Rhee Kyong, Jin Park Soo, Hui. David // Composites. Part B: Engineering. 2013. № 45, Issue 1. P. 308–320.

6. Njuguna J., Pielichowski K., Alcock J. R. Epoxy-based fiber reinforced nanocomposites // Adv. Eng. Mater. 2007. № 9. P. 835–847.

7. Wiley Encyclopedia of Composites /S. J. Park, F. L. Jin, L. Nicolais, A. Borzacchiello. John Wiley & Sons, 2011. 3444 p.

8. Pavlidou S., Papaspyrides C. D. A Review on Polymer-Layered Silicate Nanocomposites // Prog. Polym. Sci. 2008. № 33. P. 1119–1198.

9. Каргин В. А. и др. Энциклопедия полимеров: в 3 т. М.: Сов. энцикл., 1972. 3300 с.

10. Chattopadhyay D. K, Raju K. V. S. N. Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications // Progress in Polymer Science. 2007. № 32. P. 352–418.

11. Российский хим. журн. 2008. № 3. С. 30–44.

12. Ho T., Wynne K. J. A new fluorinated polyurethane: polymerization, characterization, and mechanical properties // Macromolecules. 1992. № 25. P. 352–3527.

13. Preparation and characterization of polyurethanes based on a series of fluorinated diols / R. V. Honeychuck, T. Ho, K. J. Wynne, R. A. Nissan // Chem Mater. 1993. № 5. P. 1299–1306.

14. J. Fluorine Chem. 1999. № 95. P. 97–103.

УДК 629.7.05

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-223-227

А. В. Небылов*

доктор технических наук, профессор

А. И. Панферов*

кандидат технических наук, доцент

С. А. Бродский*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ БОЛЬШОГО УПРУГОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассматриваются вопросы управления большим космическим буксиром, состоящим из мощного энергетического блока и удаленным от него блоком двигателей и автоматики. Блоки соединены длинной балкой порядка 50 м. Управление таким космическим аппаратом осложняется значительной податливостью и упругостью балки и значительным весом присоединенных к ней блоков. Рассматриваются вопросы управления ориентацией такого космического аппарата и демпфирования упругих колебаний.

Ключевые слова: система управления, ориентация, космический буксир, упругость.

A. V. Nebylov*

Dr. Sc., Tech., Professor

A. I. Panferov*

PhD, Tech., Associate Professor

S. A. Brodsky*

PhD, Tech., Senior Research Employee

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ATTITUDE CONTROL SYSTEMS DESIGN FOR A LARGE FLEXIBLE SPACECRAFT

The issues of control of a large space tug, consisting of a powerful power unit, an engine and automation unit remote from it, are considered. The blocks are connected by a long beam of about 50 m. Control of such a spacecraft (SC) is complicated by the considerable flexibility and elasticity of the beam and the significant weight of the blocks attached to it. The article discusses the issues of controlling the orientation of such a spacecraft and damping of the elastic oscillations.

Keywords: control system, attitude control, space tug, elasticity.

Одна из основных проблем освоения межпланетного пространства заключается в необходимости разработки новых мощных транспортно-энергетических модулей (ТЭМ). ТЭМ разрабатывается АО ЦНИИмаш по заказу Роскосмоса [1]. Ввод в эксплуатацию технического комплекса для подготовки спутников с ТЭМ на космодроме «Восточный» намечен на 2030 г. В настоящее время в России ведутся интенсивные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Классические химические реактивные двигатели позволяют быстро ускоряться, но требуют большого количества топлива и этим сильно ограничивают достижимую дальность полета, особенно если требуется возвращение назад. Поэтому химические реактивные двигатели включаются на короткое время только для коррекции курса. Для дальних

полетов более эффективно использовать разные типы электрореактивных двигателей. Однако из-за малой тяги для существенного приращения скорости тяжелого аппарата потребуется использовать одновременно много двигателей, что требует очень много электроэнергии. Так и родилась идея транспортно-энергетического модуля – специального буксира, который мог бы стыковаться с полезным грузом и перемещать его в пространстве. Такой модуль можно использовать для транзита спутников с низкой орбиты на геостационарную, для доставки тяжелых исследовательских станций к планетам-гигантам и, наконец, для отправки пилотируемых экспедиций в дальний космос. Общая конструктивная схема такого транспортно-энергетического модуля в развернутом виде приведена на рис. 1 [1].



Рис. 1. Схема одного из возможных вариантов транспортно-энергетического модуля

Стремление удалить приборный отсек от энергетической установки определяет большую протяженность компоновки космического аппарата (КА) в 50 м и более. Обычно основная масса такого КА более 15 т сосредоточена в приборном отсеке (там же размещается и полезная нагрузка) и в энергетической установке. Конструктивно эти два массивных отсека соединены максимально легким стержнем переменного сечения. Сложность управления таким КА определяется его значительной упругостью и сложностью пространственной конфигурации. Сложность конфигурации КА определяется наличием управляемых массивных нежестких солнечных батарей и элементов рассеивания энергии, а также большим набором ионных двигателей, расположенных на корпусе КА.

Целью работы является исследование особенностей движения большего упругого КА в неоднородном гравитационном поле Земли, других планет и в открытом космосе, синтез законов управления ориентацией КА при больших изменениях углового положения. Используется математическая модель упругого КА, полученная с использованием специально разработанного в МИПАКТ ГУАП программного пакета [2, 3]. Программный пакет позволяет по конструкции, информации о материалах и упругих свойствах отдельных элементов получить математическую модель КА в виде системы дифференциальных уравнений с переменными параметрами или передаточных функций для различных этапов полета. Эта модель является основой для синтеза законов управления, обеспечивающих подавление упругих колебаний. Разработанная программа обеспечивает 3D-визуализацию исследуемого КА и моделирование его движения при произвольных внешних воздействиях.

Основным требованием к управлению КА являются минимальный расход рабочего тела. При использовании электрореактивных двигателей, основным режимом работы которых является режим релейного переключения, требование минимального расхода рабочего тела со-

впадает условием максимального быстродействия. В общем случае уравнения движения упругой конструкции в неоднородном гравитационном поле имеют достаточно большую размерность и прямой синтез приводит к практически нереализуемым оптимальным законам регулирования. По этой причине синтез оптимального регулятора проводим по упрощенной модели КА, а при исследовании реальной точности управления используется полная модель упругого объекта управления.

Уравнение вращения КА в плоскости орбиты имеет вид

$$J_z \ddot{\phi}(t) = M_z(t),$$

где J_z – момент инерции КА относительно оси z ; M_z – момент сил относительно той же оси.

Введем обозначение $M_z/J_z = u(t)$, тогда можно записать:

$$\frac{d\dot{\phi}(t)}{dt} = \dot{\phi}(t), \quad \frac{d\dot{\phi}(t)}{dt} = u(t).$$

В соответствии с принципом максимума Понтрягина, закон оптимального управления запишется в виде

$$u(\phi, \dot{\phi}) = -u_{\max} \operatorname{sign}\left(x_1 + \frac{\dot{\phi}|\dot{\phi}|}{2u_{\max}}\right).$$

Аналогичные законы управления используются для управления ориентацией по крену и рысканию.

Программа для исследования динамических свойств системы стабилизации методом численного моделирования составлена на языке Matlab/Simulink. Структурная схема модели системы стабилизации приведена на рис. 2 (1 – вычислитель сил и моментов сил при работе двигателей ориентации; 2 – динамическая модель КА с 6 степенями свободы; 3 – формирование управляющих сигналов ориентации; 4 – двухрежимный регулятор углов тангажа и рыскания; 5 – регулятор угла крена; 6 – вычислитель момен-

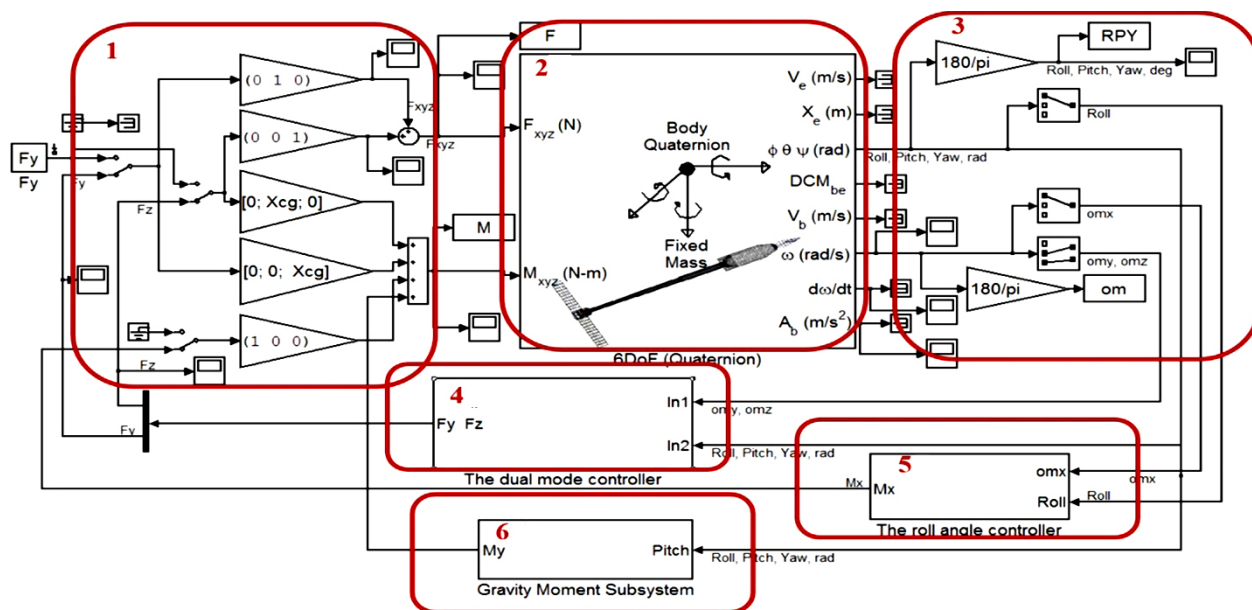


Рис. 2. Структурная схема для исследования динамических свойств системы стабилизации методом численного моделирования

та сил гравитации при вращении КА в плоскости орбиты).

Для моделирования динамики КА использована модель движения твердого тела в кватернионах, имеющаяся в библиотеке Simulink. Исходные данные задаются свойствах модели (ModelProperties).

Результаты моделирования приведены на рис. 3; 4.

При отсутствии конструкционного демпфирования упругие изгибные колебания балки описываются уравнением с неоднородными граничными условиями [4]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[EJ(x) \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} \right] + m(x) \frac{\partial^2 q(x,t)}{\partial t^2} = f(x,t),$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[EJ(x) \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} \right] + m(x) \frac{\partial^2 q(x,t)}{\partial t^2} = f(x,t),$$

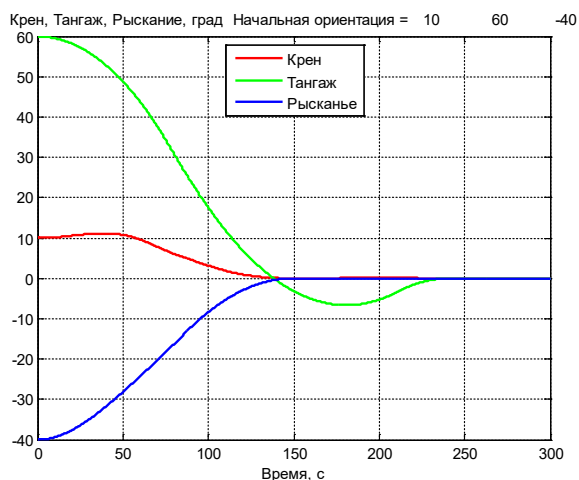


Рис. 3. Изменение ориентации КА при работе трехканальной оптимальной системы стабилизации и начальных значениях углов крена 10°, тангажа 60°, рыскания – 40°

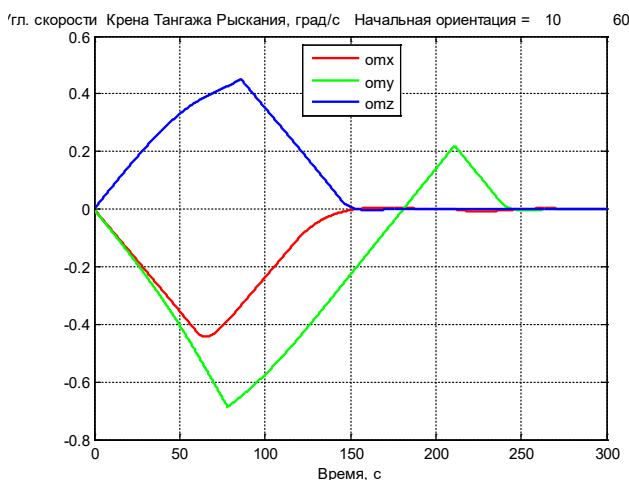


Рис. 4. Изменение угловой скорости КА при работе трехканальной оптимальной системы стабилизации и начальных значениях углов крена 10°, тангажа 60°, рыскания – 40°

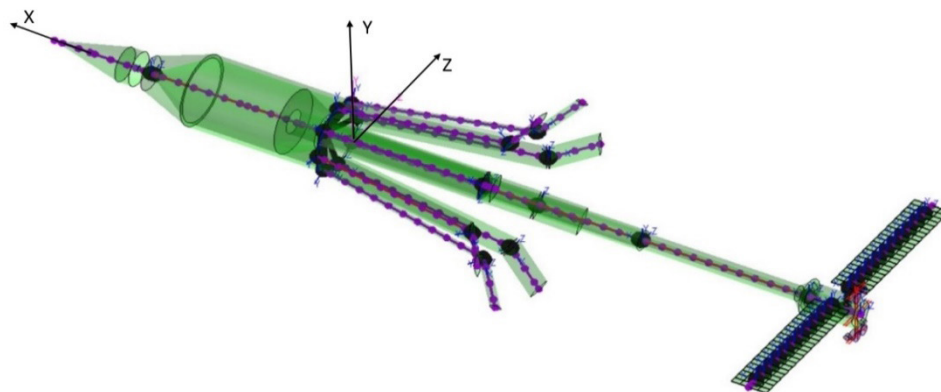


Рис. 5. Исследуемая модель КА

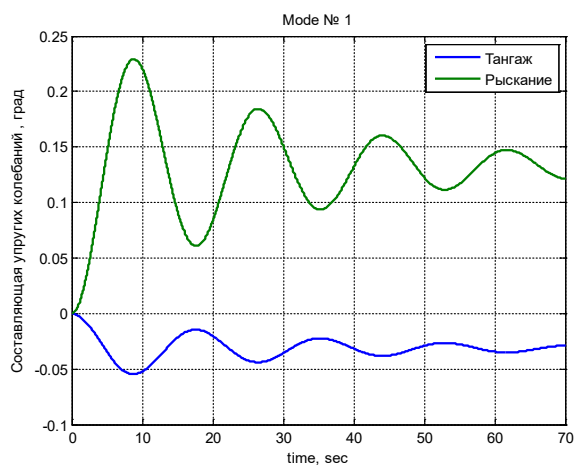


Рис. 6. Первая мода упругих колебаний

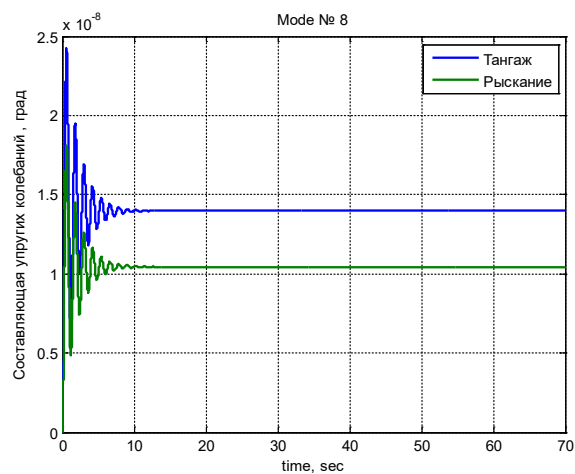


Рис. 7. Восьмая мода упругих колебаний

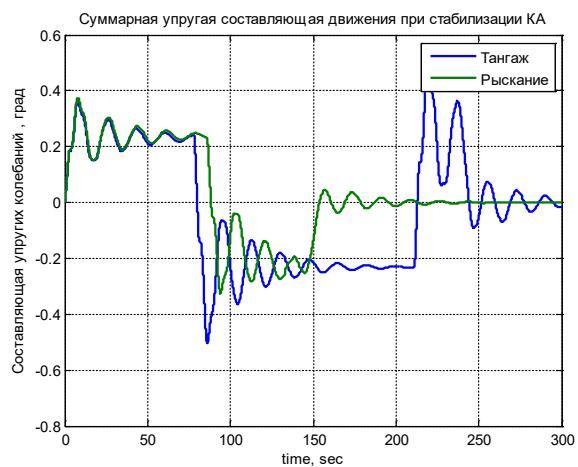


Рис. 8. Упругие колебания, сопровождающие изменение ориентации КА

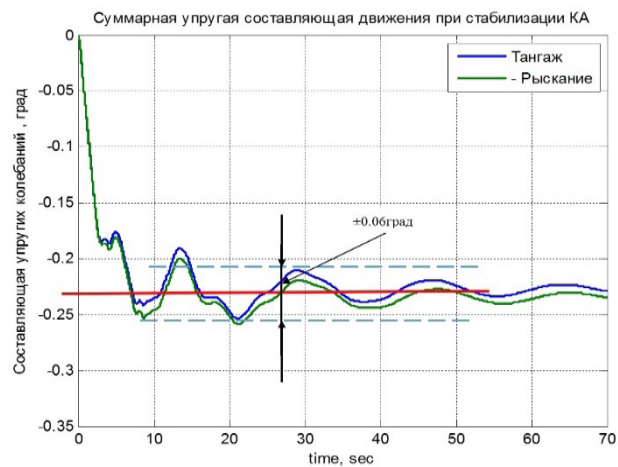


Рис. 9. Упругие колебания при коррекции с двумя управляющими импульсами

где x – координата вдоль оси стержня; $q(x, t)$ – поперечные смещения точек стержня; $EJ(x)$ – изгибная жесткость; $m(x)$ – погонная масса; E – модуль упругости; $J(x)$ – момент инерции относительно нейтральной оси; $f(x, t)$ – интенсивность внешней поперечной нагрузки. Для сложных конструкций формы и частоты собственных изгибных колебаний рассчитывают с помощью специально разработанных программ по данным о инерционно-упругих характеристиках отдельных фрагментов конструкции [5–7]. На рис. 5 приведен внешний вид исследуемой конструкции, построенный в окне Matlab.

С помощью специальной программы рассчитаны моды и формы упругих колебаний. На рис. 6; 7 приведена первая и восьмая мода упругих колебаний.

Упругие колебания возбуждаются в моменты ступенчатого переключения тяги двигателей, как это показано на рис. 8; 9.

Предложенный алгоритм коррекции упругих колебаний двумя управляющими импульсами [2, 3] позволил уменьшить амплитуду этих колебаний в 3–4 раза (рис. 9).

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Предложенные алгоритмы управления КА обеспечивают изменение его ориентации при минимальном расходе рабочего тела. Время переходного процесса поворота КА до 90° по всем осям при учете реальных ограничений на тягу двигателей не превышает 300 сек. В работе использован подход к созданию математической модели КА на основе испытаний или расчетов упругих свойств отдельных фрагментов конструкции. Предложен робастный подход демпфирования упругих колебаний, возникающих после переключений управляющих усилий, основанный на расчете параметров коротких импульсов тяги. Моделирование подтвердило эффективность такого подхода.

Библиографический список

1. Россия построит ядерный космический буксир для межпланетных перелетов. URL: <https://www.ixbt.com/news/2020/10/12/rossija-postroit-jadernyj-kosmicheskij-buksir-dlja-mezhplanetnyh-pereljetov.html> (дата обращения: 25.11.2020).
2. Interplanetary Spacecraft Control Methods and Algorithms for Large Cargo Delivery / A. Nebylov, A. Panferov, S. Brodsky and B. Birjukov // 2020 IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). Pisa, Italy, 2020. P. 561–565. Doi: 10.1109/MetroAeroSpace48742.2020.9159967.
3. Panferov A., Nebylov A., Brodsky S. Control system of orientation for the elastic spacecraft // 4th International Conference and Exhibition on Satellite & Space Missions. Rome, Italy, 2018. 18–19 June.
4. Динамика ракет: учеб. для студ. вузов / К. А. Абгарян, Э. Л. Калязин, В. П. Мишин [и др.]; под общ.

ред. В. П. Мишина. М.: Машиностроение, 1990. 467 с.

5. Panferov A. I., Nebylov A. V., Brodskiy S. A. Theory and Software Package for Simulation and Smart Control Design for Complex Flexible Aerospace Vehicles // 18th IFAC World Congress / Universita Cattolica del Sacro Cuore. Milan, 2011.

6. Panferov A. I., Nebylov A. V., Brodskiy S. A. Software Package for Simulation and Control System Design for Nonrigid Space Plant IFAC sponsored // Embedded Guidance, Navigation and Control in Aerospace (EGNCA – 2012). India, Bangalore, 2012.

7. Panferov A. I., Nebylov A. V., Brodskiy S. A. Synthesis of optimal distributed measurement systems for control of an elastic object. Selected, peer reviewed papers from the AEROTECH V conference // Progressive Aerospace Research. 29–30 October 2014. Kuala Lumpur, Malaysia, 2014. P. 208–213. URL: <http://www.scientific.net/AMM.629.208> (дата обращения: 25.11.2020).

УДК 629.735.3

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-228-232

Н. А. Овчинникова*

кандидат технических наук, доцент

Д. В. Зайкин*

магистрант

А. Д. Колесниченко*

магистрант

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРОТИВОЮЗОВАЯ СИСТЕМА

Вопрос о торможении самолета был и является важным и актуальным. Нашли применение в качестве тормозов следующие устройства: воздушные тормоза (аэродинамические тормозные щитки), тормозные парашюты, реверсы двигателей, но, несмотря на это, основная доля горизонтальной составляющей кинетической энергии расходуется тормозами колес. При торможении шасси может возникнуть такое явление, как юз, в этом случае линейная скорость поверхности колес ниже скорости опорной поверхности относительно транспортного средства.

Ключевые слова: самолет, тормоза, противоюзовая система, торможение.

N. A. Ovchinnikova*

PhD, Tech., Associate Professor

D. V. Zaykin*

Postgraduate Student

A. D. Kolesnichenko*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ANTI-SLIP SYSTEM

The issue of aircraft braking was and is important and relevant. The following devices have found applications as brakes: air brakes (aerodynamic brake pads), brake parachutes, engine reversals, but despite this, the main share of the horizontal component of kinetic energy is consumed by the wheel brakes. When braking the chassis, such a phenomenon as skidding may occur, in which case the linear speed of the wheel surface is lower than the speed of the support surface relative to the vehicle.

Keywords: aircraft, brakes, anti-slip system, braking.

При движении колес юзом повышается износ пневматиков, а коэффициент трения при этом уменьшается, что приводит к увеличению пробега самолета. Если же присутствует юз только одного колеса, то возможен резкий разворот самолета и сход его с ВПП (взлетно-посадочной полосы). Как следствие, покрышки могут прийти к полному разрушению, а это ведет к потере устойчивости. Применение системы автоматического регулирования торможением, несомненно, увеличивает ресурс пневматики, повышает безопасность и уменьшает длину пробега самолета [1].

Среднее значение коэффициента трения на тормозном участке примерно на 25% меньше, чем максимальное значение. Максимальное значение коэффициента трения на сухом бетоне даже может превышать значение 0,8, а среднее значение не превышать 0,5 [2]. При попадании колеса на обледенелую поверхность коэффициент трения стремится к 0.

По замедлению угловой скорости вращения колеса противоюзовая система отслеживает превышение тормозного момента над моментом сил трения о ВПП, которое приводит к проскальзыванию покрышки колеса по поверхности ВПП. При наличии превышения включается система растормаживания колес для сброса давления из гидравлического дозатора. За счет этого происходит предотвращение полного затормаживания колес и их движение юзом по ВПП [3]. Однако летчик в процессе торможения колес может и не менять уровень нажатия на тормозные педали. Угловая скорость колеса начинает возрастать при уменьшении тормозного момента. Противоюзовая система подает сигнал на прекращение стравливание давление из тормоза, и давление в нем снова возрастает до величины, соответствующей степени торможения, заданной летчиком. Информация о частоте вращения предоставляется с каждого колеса ос-

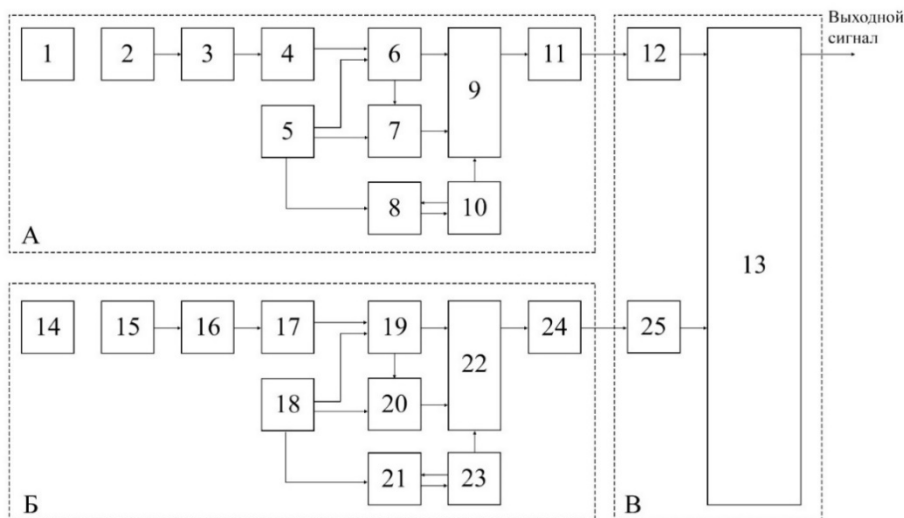


Рис. 1. Структурная схема

новых стоек шасси, так как именно эти колеса являются тормозными.

На рис. 1 показана структурная схема противоюзовой системы.

На каждом колесе располагаются магниты 1, 14 на диске с внутренней стороны стойки шасси. На против каждого колеса шасси (на уровне магнитов) крепятся датчики Холла 2, 15. Далее подробно будет рассмотрена цепочка А, так как цепочка Б аналогична данной. Датчик Холла 2 [4] подает напряжение в момент, когда магнит 1 проходит мимо датчика. Сигнал с датчиков поступает на усилитель 3, для увеличения напряжения больше требуемого. Сигнал увеличивается выше требуемого с учетом падения напряжения, для передачи данных с датчиков, на вычислительное устройство. Усиленный сигнал подается через параллельно подключенный стабилитрон 4, который ограничивает напряжение. Если сигнал больше требуемого, то напряжение через него уходит на минус. Полученный сигнал подсчитывается четырехбитными счетчиками 6, 7. Обнуляются данные счетчики таймером 5 через дифференцирующую цепочку, которая формирует кратковременный импульс в момент подачи сигнала (при первом фронте). Сигнал со счетчиков передается по последовательному коду при помощи шестнадцатеричного мультиплексора 9, который переключается четырехбитным счетчиком 10. Счетчик 10 переключается сигналами таймера 8, который запускается во время «положительного» (5В) периода таймера 5 (через инвертор и RC цепь), а обнуляется счетчиком 10 (при значении «1111», с помощью логических элементов «И»).

На рис. 2 изображены временные диаграммы сигналов с датчика Холла.

Сигналы с дифференцирующей цепочки имеют следующий вид (рис. 3, а). В нашем случае для запуска таймера 2 требуется только положительная составляющая сигнала, поэтому после дифференцирующей цепочки требуется диод, который пропустит только положитель-

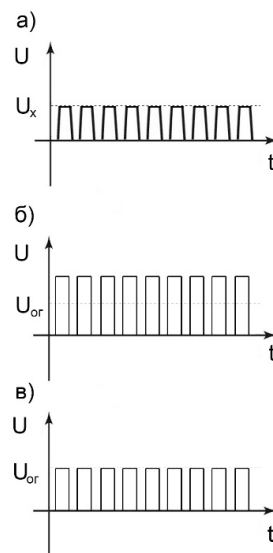


Рис. 2. Временные диаграммы с датчика Холла и последующая обработка сигнала:
а – график сигналов с датчиков Холла;
б – усиленный сигнал; в – сигнал на выходе ограничителя

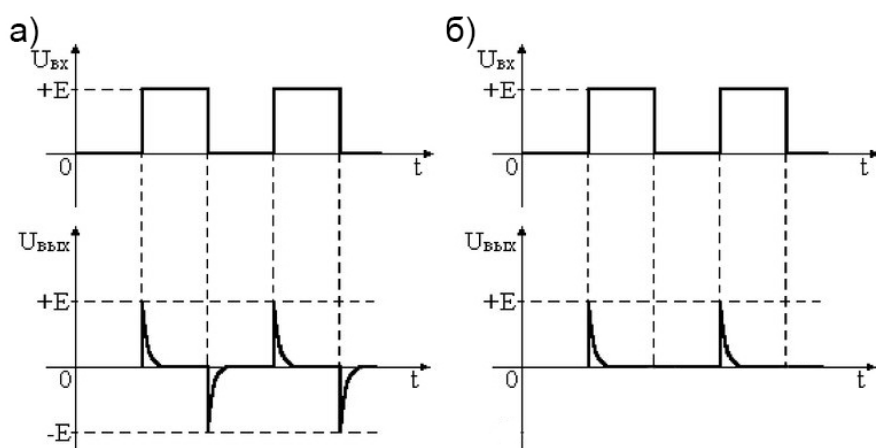


Рис. 3. Сигналы с дифференцирующей цепочки

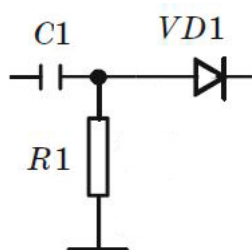


Рис. 4. Схема дифференцирующей цепочки RC

ную часть сигнала. Тогда сигнал примет следующий вид (рис. 3, б).

Схема дифференцирующей цепочки показана на рис. 4.

Сигналы на входах мультиплексора [5] показаны на рис. 5.

На выходе мультиплексора сигнал передается по последовательному протоколу передачи информации UART [6], и поступает на микросхему «MAX 232» [7], которая преобразует уровни сигнала из 0–5В (UART) в +–15В (RS-232).

На рис. 6 изображены уровни, используемые в протоколе UART. Стартовый бит – логический «0», поэтому приемник UART ждет перепада из 1 в 0. Приемник отсчитывает 9 битовых длительностей подряд. Первые 8 бит являются принимаемой информацией, последнее значение проверочное (стоп-бит – «1»).

Передача данных осуществляется по одному биту в равные промежутки времени. Для конкретного соединения задается скорость передачи информации, которая измеряется в бодах. Существуют стандарты скоростей: 300; 600;

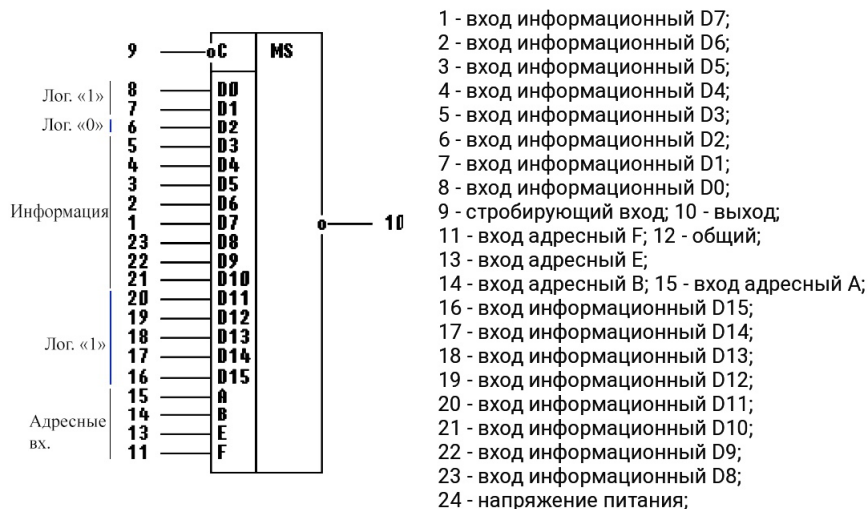


Рис. 5. Сигналы на входах мультиплексора

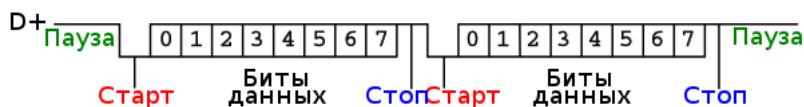


Рис. 6. Уровни сигнала, используемые в протоколе UART

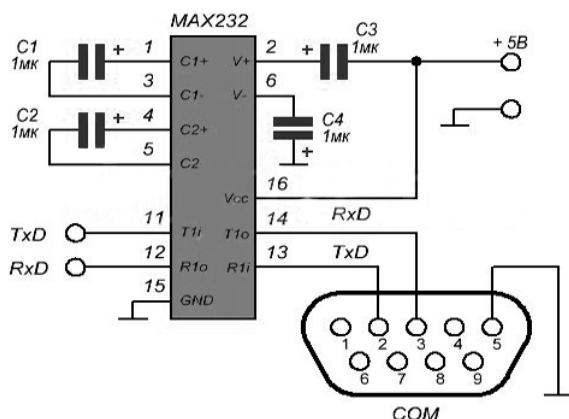


Рис. 7. Схема включения «MAX232»

1200; 2400; 4800; 9600; 19200; 38400; 57600; 115200; 230400; 460800; 921600.

Для преобразования уровней сигналов по последовательному протоколу передачи данных UART в уровни стандарта RS-232 может использоваться микросхема «MAX232». Свою популярность микросхема MAX232 заслужила из-за использования однополярного пита-

ния в 5 В, а уровни напряжения RS-232 (–10 и +10 В) генерируются самой микросхемой. Она имеет два канала приема и два канала передачи данных. Схема включения MAX232 показана на рис. 7.

Преобразование уровней сигнала UART/RS232 изображена на рис. 8.

На рис. 9 изображены временные диаграммы сигналов.

При «положительном» (5В) периоде таймера 1 (логическая «1») происходит подсчет сигнала. При втором периоде (логическая «0») производится передача информации. При переходе первого счетчика с логической «1» на логический «0», через инвертор и RC цепь (график «RC») подается кратковременный импульс, который запускает таймер 2. Этот таймер поочередно переключает каналы шестнадцатеричного мультиплексора, последовательно выдавая информацию со счетчиков. На остальные контакты мультиплексора подается питание 5В (логическая «1»), а на вход, который расположен до контактов подключения счетчиков, подается логический «0» (старт бит). При переключении всех контактов мультиплексора цикл заканчивается на логической «1». Тогда счетчик, который переключает мультиплексор обнуляется и останавли-

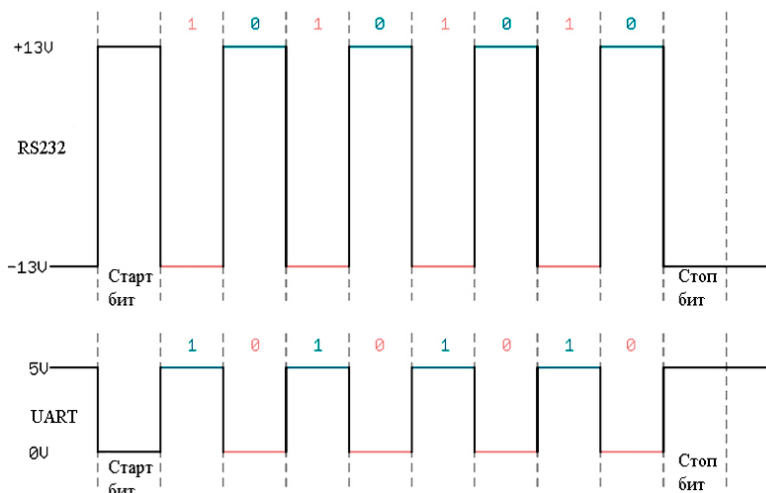


Рис. 8. Преобразование уровней сигнала UART/RS232

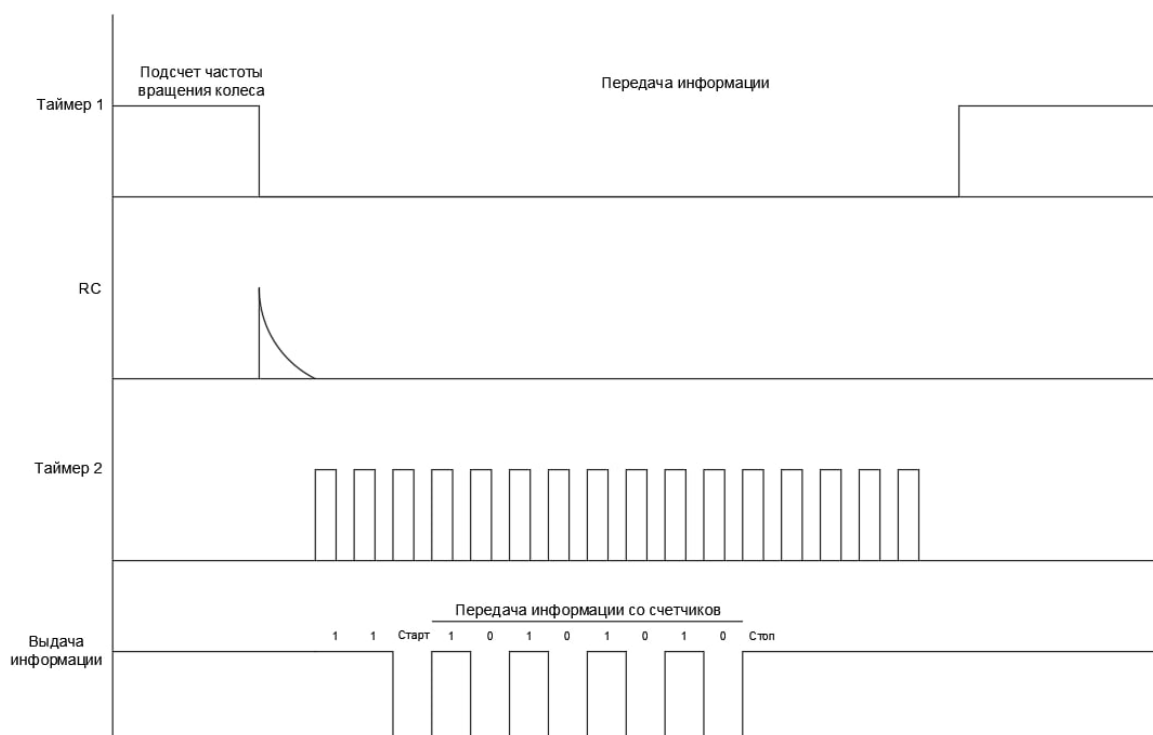


Рис. 9. Временные диаграммы

ливают таймер 2 (при помощи логических элементов «И» в момент выдачи сигнала «1111»).

Контакты подключения счетчиков подается логический «0» (старт бит) – подробнее на рис. 9. При переключении всех контактов мультиплексора цикл заканчивается на логической «1» (контакт 8 – рис. 5). Тогда счетчик, который переключает мультиплексор обнуляется и останавливает таймер 2 (при помощи логических элементов «И» в момент выдачи сигнала «1111»).

Библиографический список

1. Егер С. М., Матвеев А. М., Шаталов И. А. Основы авиационной техники 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 721 с.
2. Житомирский Г. И. Конструкция самолетов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 1995. 415 с.
3. Боднер В. А. Приборы первичной информации: учебник для авиационных вузов. М.: Машиностроение, 1981.
4. Принцип действия датчика холла. URL: http://autoprivat.ru/remont_avto/princip_dejstviya_datchika_holla.html (дата обращения: 18.11.2020).
5. ANALOG MULTIPLRXER. URL: <https://www.promelec.ru/fs/sources/a6/63/bd/35/3699d2babab3b647cefc5d49.pdf> (дата обращения: 18.11.2020).
6. Интерфейс UART. URL: https://musbench.com/e_digital/uart.html (дата обращения: 18.11.2020).
7. MAX232 (MAX3232) справочные данные. URL: <https://zipstore.ru/blog/max232-max3232-spravochnye-dannye/> (дата обращения: 18.11.2020).

УДК 681.51

А. М. Павлов*

старший преподаватель

О. С. Лесонен*

аспирант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАРСА

Рассмотрены вопросы управления и навигации беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для исследования Марса. Описаны технические предпосылки для создания навигационной системы таких беспилотных комплексов в условиях отсутствия спутниковой системы глобального позиционирования.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, Марс, навигация, нейронная сеть.

A. M. Pavlov*

Senior Lecturer

O. S. Lesonen*

PhD Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

REQUIREMENTS FOR THE CONTROL AND NAVIGATION SYSTEM OF UAV FOR MARS EXPLORATION

This article describes for control and navigation system requirements of UAV for exploration of Mars. The technical prerequisites for creating navigation systems for such UAVs without global positioning satellite system are described.

Keywords: UAV, Mars, navigation, neural network

Введение

Марс – четвертая по удаленности от Солнца и седьмая по размерам планета в Солнечной системе. Изучение Марса с близкого расстояния началось во второй половине XX в. с помощью целой серии советских и американских космических аппаратов. На сегодняшний день вокруг планеты летает несколько автоматических станций, а на его поверхности проводят исследования марсоходы. Однако скорость передвижения марсоходов достаточно мала, что в определенной степени ограничивает скорость изучения поверхности и атмосферы Марса. Например, марсоход «Curiosity» к настоящему времени проехал по поверхности Марса 16,88 км [1].

Исследования Марса с помощью специальных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)

Искусственные спутники по исследованию поверхности и атмосферы имеют определенные ограничения.

Наличие атмосферы, пусть даже и весьма слабой, позволяет запускать в ней летательные аппараты самолетного или вертолетного типа, которые могут значительно ускорить процесс изучения поверхности и атмосферы Марса. На сегодняшний день существует значительное количество проектов таких «марсолетов» (рис. 1).



Рис. 1. Визуализация процесса отделения от спускаемого аппарата и запуска марсолета проекта Mars Aircraft for Geophysical Exploration



Рис. 2. Беспилотный вертолет «Ingenuity»

Марсолеты за время своего функционирования могут исследовать значительные площади марсианского ландшафта – опасные или непроходимые участки пересеченной местности, интересные в геологическом плане недоступные для марсоходов.

Кроме того, они могут осуществлять фотографирование в высоком разрешении, регистрировать состав атмосферы и магнитные аномалии; дистанционно изучать минералогические характеристики и составлять схемы движения воздушных масс.

Впервые идея создать специальный БПЛА для исследования Марса появилась в семидесятые годы [2]. С тех пор было предложено значительное количество таких проектов разной степени проработанности. Однако по разным причинам они не были реализованы.

30 июля 2020 г. состоялся запуск нового американского марсохода «Perseverance» в рамках миссии «Марс-2020», который должен достичь поверхности Марса 18 февраля 2021 г. в кратере Джезеро [3]. Отличительной особенностью нового марсохода является наличие на его борту миниатюрного беспилотного вертолета «Ingenuity» (рис. 2), созданного сотрудниками Лаборатории реактивного движения NASA в рамках проекта «Mars Helicopter» [3, 4].

Главная задача вертолета «Ingenuity» заключается в демонстрации возможности устойчивого, управляемого полета в марсианской атмосфере. Вертолет выполнен по соосной схеме с винтами диаметром 1,2 м. Аппарат оснащен аккумуляторами, подзаряжающимися от солнечных панелей, цветной камерой и системами навигации и передачи данных. Его масса – 1,8 кг.

Запланировано, что БПЛА совершит пробный 30-секундный подъем на три метра, и пять полетов, длительностью 90 с, в ходе которых он будет подниматься на высоту до нескольких сотен метров [4].

Система управления и навигации

Из-за значительного расстояния между Землей и Марсом, которое составляет от $54,6 \cdot 10^6$ до $401 \cdot 10^6$ км, радиосигнал до Марса идет со значительной задержкой: от 3 до 22 мин [5], что накладывает требование к полной автономности летательного аппарата, так как очевидно, что ручное управление скоростным объектом просто невозможно.

Таким образом, система управления и навигации марсолета должна быть полностью автономной.

Такие полностью автономные БПЛА, выполняющие полет по заранее заложенному (и корректируемому во время полета) маршруту, а также взлет и посадку без участия человека, сегодня имеют широкое распространение как в военных, так и гражданских целях на Земле. Это стало возможно благодаря наличию спутниковых навигационных систем (СНС) и интернета.

Однако, СНС отсутствует на Марсе, поэтому построение навигационной системы марсолета по типу земной не представляется возможным.

В начале 2000-х гг. существовала идея создать на Марсе аналог спутниковой навигационной системы класса GPS – проекты Marsnet и Marsat подразумевали развертывание вокруг Красной планеты небольших спутников, предоставляющих навигационные сведения с точностью 10–100 м марсоходам и станциям на орбите.

Но данная идея не получила развития. И в целом, большого смысла развертывания СНС на данном этапе исследования Марса не имеет ни экономического, ни практического смысла [6].

Марсоходы для определения собственного местоположения по небесным телам и по визуальной привязке к статичным объектам на поверхности планеты. Конечно, марсоходы перемещаются с небольшой скоростью, измеряемой метрами в час, что не сопоставимо со скоростью полета марсолета самолетного типа (например, у MarsFlyer крейсерская скорость полета должна составлять 150 м/с). Тем не менее современный уровень развития микроэлектроники, ее вычислительных способностей и технологий обработки данных позволят решить задачу навигации по характерным объектам с достаточной точностью.

Кроме того, на сегодняшний день выполнено достаточно много подробных кадров Марса, как с орбиты, так и непосредственно с поверхности планеты. На их основе NASA создало картографический сервис для Марса – Mars Trek [7].

Карта Марса, составленная из изображений, полученных в результате работы нескольких аппаратов. Безусловно, эта карта несколько уступает по разрешению карте Google Earth, позволяет менять масштаб карты ландшафта.

Карта оснащена несколькими слоями, каждый слой – отдельный набор изображений конкретного аппарата. Кроме увеличения и приближения, изменения ракурсов, есть возможность изучить наиболее известные и значимые точки Марса, получив по ним исчерпывающую справку.

Более того, пользователь, при желании, может загрузить STL-файлы, если и распечатать участок поверхности Марса в виде модели на 3D-принтере.

Следует заметить, что карта в инфракрасном диапазоне четче потому что облака и пыль на планете прозрачны для инфракрасного света.

Также существует сервис Google Mars [8]. Он, аналогичен Google Earth, и сделан на той же платформе. Карта Марса выполнена по снимкам зонда Mars Odyssey. Google Mars – это цветная 3D-топографическая карта Марса, которое дает представление о высотах местности и позволяет также переключаться между режимами просмотра, видимым и инфракрасным в реальном времени.

Значительный прогресс в области машинного обучения и его способности обрабатывать большое количество различных видов информации и находить в «циклопическом» объеме связи и закономерности невидимые человеку позволяет вывести решение задач навигации на других планетах на новый уровень.

Инженеры Frontier Development Lab (подразделение NASA) и Artificial Intelligence Products Group (подразделения Intel), разработали технологию «планетарной навигационной системы», основанную на использовании массива фотоснимков лунных ландшафтов, сделанных космическими аппаратами и экспедициями американских астронавтов [9].

Для создания «лунной» навигационной системы специалисты по машинному обучению NASA и Intel создали нейронную сеть, обученную на 2,4 млн фотоснимков лунной поверхности, которые сеть объединила в глобальный ландшафт виртуальной Луны. Данная нейронная сеть по предоставленному снимку ландшафта определяет его местоположение с высокой точностью [9].

Эксперименты по использованию данной сети лунной навигации показали его достаточную для практического применения точность определения координат места нахождения на

Луне и прокладки маршрутов к намеченным пунктам [9].

Сейчас ведется работа по созданию нейронной сети по обработке фотоснимков поверхности Марса. Что, наряду со значительным прогрессом в области автомобильных автопилотов (Tesla, Google и т. д.) с технологией машинного зрения [10], создает предпосылки для создания автопилота для марсианского БПЛА с высокой степенью автономности и точности решения навигационных задач без использования СНС. Подобный автопилот приобретает особую актуальность для проектов марсолетов, предназначенных для исследования ущелий, каньонов и пещер, где коррекция ИНС с помощью средств астронавигации невозможна.

Заключение

Создание БПЛА для исследования поверхности Марса является новым этапом изучения планеты. Однако, дистанционное управление невозможно по причине большой задержки сигнала из-за большого удаления Марса от Земли (от 3 до 22 мин, в зависимости от взаимного расположения планет в конкретный момент времени). Поэтому основное требование к таким БПЛА должны обладать системой управления с высокой степенью автономности.

Решение навигационной задачи с помощью традиционных способов для земных условий (СНС, коррекция инерциальной навигационной системы с помощью СНС) невозможна, ввиду отсутствия навигационной спутниковой группировки на орбите Марса.

Поэтому будущие марсианские БПЛА будут иметь системы астронавигации, комплексированные с ИНС БПЛА.

Значительные успехи в области систем определения координат по фотоизображению ландшафта, на основе нейронных сетей, а также автопилотов на основе машинного зрения позволяют предположить, что перспективные марсолеты могут оснащаться автопилотами на основе нейронных сетей с элементами машинного зрения. Машинное зрение, может быть реализовано на основе:

- радиолокационного зондирования подстилающей поверхности и соотнесением полученной «слепка» с математической моделью планеты загруженной в бортовой вычислительный комплекс;

- видеоизображения (в различных диапазонах) и соотнесением полученного кадров с математической моделью планеты загруженной в бортовой вычислительный комплекс.

Библиографический список

1. Сайт НАСА. Раздел Mars Curiosity. URL: <https://mars.nasa.gov/msl/home/> (дата обращения: 04.12.2020).
2. NASA studies Mars Aircraft // Aviation Week & Space Technology. 1979. 5 März. S. 39.
3. НАСА успешно запустило тяжелую ракету-носитель Atlas V с новым марсоходом Perseverance. URL: <https://habr.com/ru/news/t/513152/> (дата обращения: 05.12.2020).
4. Вертолет нового марсохода NASA назвали «Находчивость». URL: <https://nauka.tass.ru/nauka/8373203/> (дата обращения: 04.12.2020).
5. Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии: учеб. пособие. 2-е изд., испр. М.: Едиториал УРСС, 2004. 544 с.
6. GPS на Марсе. URL: [https:// itweek.ru](https://itweek.ru) (дата обращения: 04.12.2020).
7. Mars Trek. URL: <https://trek.nasa.gov/mars/> (дата обращения: 06.12.2020).
8. Карта Карса. URL: <https://www.google.ru/mars/> (дата обращения: 06.12.2020).
9. Навигация и позиционирование на Луне, Марсе и других планетах: какие проблемы пришлось решить ученым?. URL: <https://www.gadgetsshop.ru/2018/09/navigaciya-i-pozicionirovanie-na-lune-mar-se-i-drugih-planetah-kakie-problemy-prishlos-re-shit-uchenym.html/> (дата обращения: 06.12.2020).
10. Марков Д. Разобрали принцип работы автопилотов в современных авто. Насколько это безопасно?. URL: <https://www.iphones.ru/iNotes/self-driving-vehicles-how-it-works/> (дата обращения: 06.12.2020).

УДК 629.783

М. Д. Пецевич*

магистрант

Е. К. Тарасова*

магистрант

Ю. А. Кузьмичев*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С КРУПНОГАБАРИТНОЙ АНТЕННОЙ

Рассмотрен подход к построению системы стабилизации космического аппарата с крупногабаритной антенной. Он заключается в добавлении к алгоритму управления слагаемого, характеризующего параметры упругих колебаний корпуса космического аппарата. Для выделения параметров упругих колебаний предложено использовать резонансный фильтр. Рассмотрены условия применения резонансного фильтра.

Ключевые слова: космический аппарат, резонансный фильтр, система угловой стабилизации.

M. D. Petsevich*

Postgraduate Student

E. K. Tarasova*

Postgraduate Student

Y. A. Kuzmichev*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE CONSTRUCTION OF A SPACECRAFT STABILIZATION SYSTEM WITH A LARGE-SIZE ANTENNA

An approach to the construction of a spacecraft stabilization system with a large-sized antenna is considered. It consists in adding a term to the control algorithm that characterizes the parameters of elastic vibrations of the spacecraft body. It is proposed to use a resonant filter to select the parameters of elastic vibrations. The conditions for using a resonant filter are also considered.

Keywords: spacecraft, resonant filter, angular stabilization system

За последние 20 лет вырос интерес к использованию в составе космических аппаратов (КА) крупногабаритных разворачиваемых в рабочее положение в космосе конструкций антенн различных диапазонов частот и назначения. Апертуры используемых антенн на этих КА имеют диаметры от 9–12 до 50 м. Это позволяет сформировать узкие высокоэнергетические лучи [1]. Кроме того, на проектируемых КА размеры антенн предполагается значительно увеличить. В настоящее время ведутся работы по созданию крупногабаритной антенны диаметром около 100 м.

Обеспечить абсолютную жесткость конструкции невозможно, что приводит к появлению упругих колебаний, которые ухудшают качества управления угловым движением КА и могут стать причиной потери устойчивости системы стабилизации.

На рис. 1 показан проектный облик КА с развернутой антенной системой.

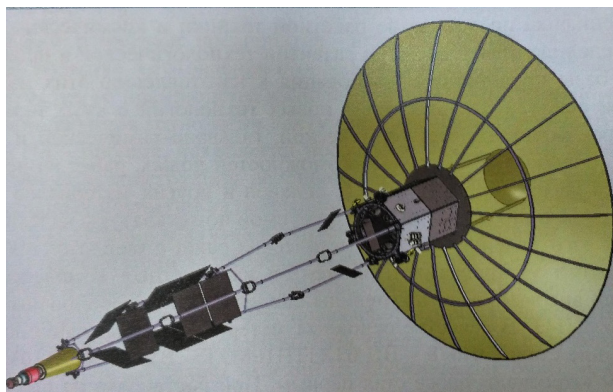


Рис. 1. Проектный облик КА с развернутой антенной системой

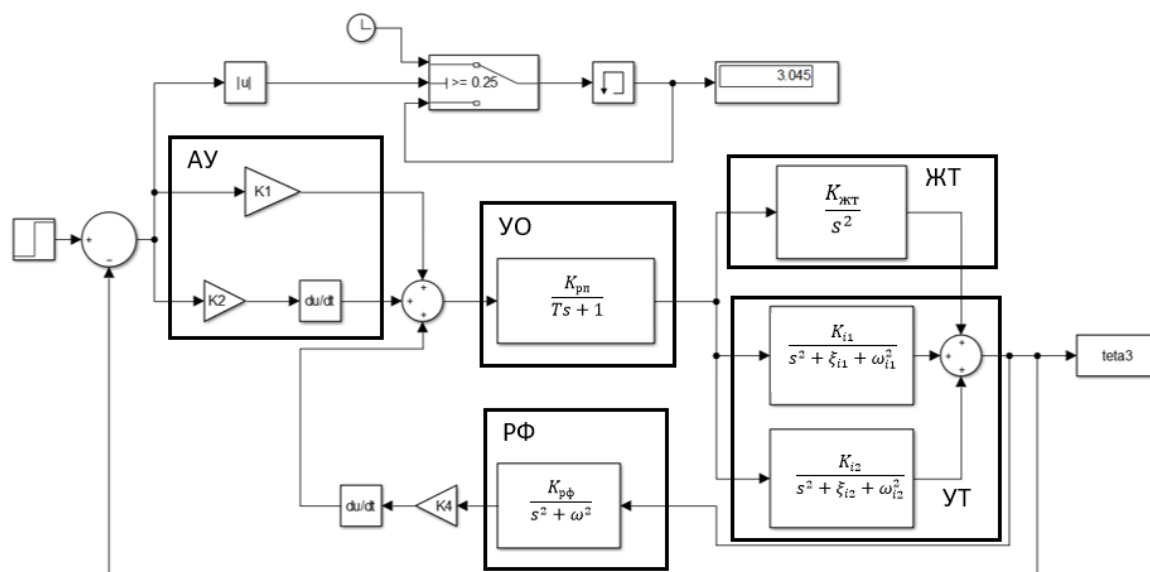


Рис. 2. Схема моделирования СУС КА с применением РФ

Низкая жесткость таких конструкций при изменении ориентации КА приводит к нежелательным колебаниям в системе угловой стабилизации, которые могут нарушать работу целевой аппаратуры.

На сегодняшний день известны и широко применяются следующие алгоритмические методы борьбы с колебаниями корпуса КА. К ним относятся амплитудная и фазовая стабилизации [2].

Эти методы эффективны при значительной разности частот колебаний первого тона и частоты функционирования системы угловой стабилизации (СУС). Также для повышения быстродействия СУС КА могут включаться дополнительные измерительные устройства, сигналы от которых будут добавляться в компенсирующий сигнал подавления нежелательных колебаний. Однако их использование увеличивает стоимость конструкции и массу КА, что не всегда может быть допустимо.

Поскольку перечисленные методы имеют недостатки, предлагается ввести в систему стабилизации низкочастотный резонансный фильтр (РФ) для получения дополнительной информации об упругих колебаниях заданного тона и использовании этой информации в алгоритмах управления угловым движением КА.

Реализовать резонансный фильтр можно с помощью трех колебательных контуров, два из которых соединены последовательно, а один – параллельно. Последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности

на резонансной частоте имеют малое сопротивление протекающему току. Параллельное соединение катушки индуктивности и конденсатора имеет на резонансной частоте большое сопротивление и малое на других частотах [3].

С развитием современных технологий появилась возможность избежать использование катушки индуктивности и конденсатора для производства РФ на борту КА. Фильтр можно реализовать на бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) КА путем задания консервативного звена.

Для исследования возможностей использования РФ для подавления упругих колебаний была разработана математическая модель СУС КА. Структурная схема модели при использовании программного комплекса Matlab Simulink показана на рис. 2 (АУ – алгоритм управления; УО – управляющий орган; ЖТ – объект, представляющий из себя жесткое тело; УТ – упругие тоны колебаний; РФ – резонансный фильтр).

Рассмотрим переходные процессы в СУС КА в случае, когда частота, на которую настроен фильтр, будет совпадать с частотой первого тона колебаний.

Результат моделирования показан на рис. 3.

При переориентации КА на 5° переходный процесс входит в зону допустимых значений через 4, 505 с. Однако, применяя РФ в реальных условиях, необходимо учесть то, что заранее не будет известна частота, на которую настраивается фильтр. На рис. 3 представлен результат моделирования, когда разность частот настрой-

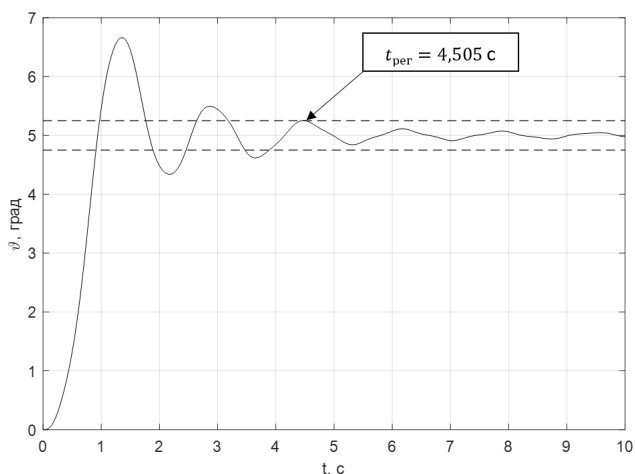


Рис. 3. Переходный процесс в СУС КА с точной настройкой РФ

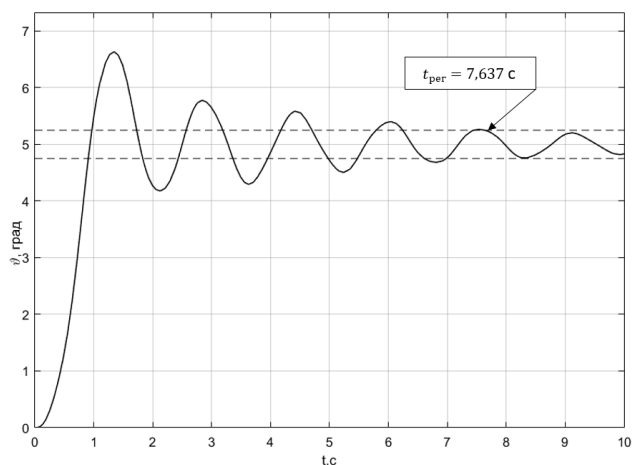


Рис. 4. Переходный процесс в СУС КА с разностью частот 0,3 Гц

ки фильтра и первого тона упругих колебаний составляет 0,3 Гц.

Таким образом, отличие значения частоты РФ от частоты заданного тона колебаний КА приводит к ухудшению качеств функционирования СУС КА, снижается быстродействие системы, увеличивается время переходного процесса увеличивается. Не исключается также и потеря устойчивости СУС КА. Для применения такого подхода к построению СУС необходима априорная информация о параметрах упругих тонов объекта управления. Кроме того, собственные частоты колебаний КА могут изменять значения в зависимости от условий и времени функционирования. Поэтому для эффективного использования РФ в СУС КА помимо

априорной информации об упругих колебаниях необходимо разработать алгоритм автоподстройки частоты РФ.

Библиографический список

1. Способ компенсации деформаций конструкции крупногабаритной антенны космического аппарата / Е. В. Бикеев, Е. Н. Якимов, М. Г. Матыленко, Г. П. Титов // Вестн. СибГАУ. 2016. № 3. С. 673–683.
2. Лапшин Ю. В. Системы управления ракет-носителей и космических аппаратов. СПб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2012. 158 с.
3. Фильтры высоких и низких частот (частотный фильтр). URL: <https://meanders.ru/filters.shtml> (дата обращения: 04.12.2020).

УДК 629.7.05

В. П. Семенова*

магистрант

В. А. Авдеев*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРИМЕНЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В БОРТОВОЙ СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

Рассмотрен вариант использования навигационной аппаратуры потребителя глобальных навигационных спутниковых систем в системе предупреждения столкновений воздушных судов. Приведены вариант модернизации и расчет радиолинии существующей системы для организации режима относительных измерений спутниковых навигационных систем.

Ключевые слова: предотвращение столкновений, воздушное судно, спутниковая навигационная система, радиолиния.

V. P. Semenova*

Postgraduate Student

V. A. Avdeev*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

APPLICATION OF MEASUREMENTS BASED ON SIGNALS FROM SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS IN THE ONBOARD COLLISION AVOIDANCE SYSTEM

The article describes a option of using a navigation equipment of the consumer of global navigation satellite systems in a aircraft collision avoidance system. A variant of modernization and calculation of the radio link of the existing system for organizing the mode of relative measurements of satellite navigation systems is presented.

Keywords: collision avoidance, aircraft, satellite navigation system, radio link.

Структурная схема бортовой системы предупреждения столкновений (БСПС) приведена на рис. 1. В комплект необходимого оборудования системы входят: компьютерный блок, две приемопередающие антенны, приемоответчик с отдельными для него антеннами, пульт управления и дисплей – индикатор.

Устройство, используемое в качестве приемоответчика, также называют транспондером. Он может работать в режимах А, С, S, сигналы которых несут различную информацию. Пульт управления является трехпозиционным переключателем этих режимов для приемоответчика. Используя принцип вторичной радиолокации, в ответном сигнале он передает не только сведения о положении объекта, но и идентификационные данные с дополнительной информацией. Получаемые данные отправляются в вычислительный блок, который объединяя данные о воздушных судах, вычисляет степень опасности каждого из них и составляет кар-

ту защищаемого пространства вокруг самолета, на котором БСПС установлена. В случае возникновения опасности столкновения, вычислительный блок, в соответствии со своей программой, определяет необходимый маневр для того, чтобы обеспечить расхождение самолетов по высоте. На дисплее-индикаторе визуализируются команды для экипажа и отображаются положения близко летящих самолетов [1].

Для того, чтобы система предупреждения столкновений обнаруживала самолет, взаимодействовала с ним и выдавала согласованную команду по маневру, необходима полная комплектация БСПС на обоих воздушных судах. Также, если датчики конфликтного самолета не выдают данные о своей высоте, система может не индизировать его на дисплее. При взлете и снижении на определенных высотах автоматически могут включаться предупреждения об опасности, которые могут затруднять пилотирование и отвлекать внимание экипажа. Кроме

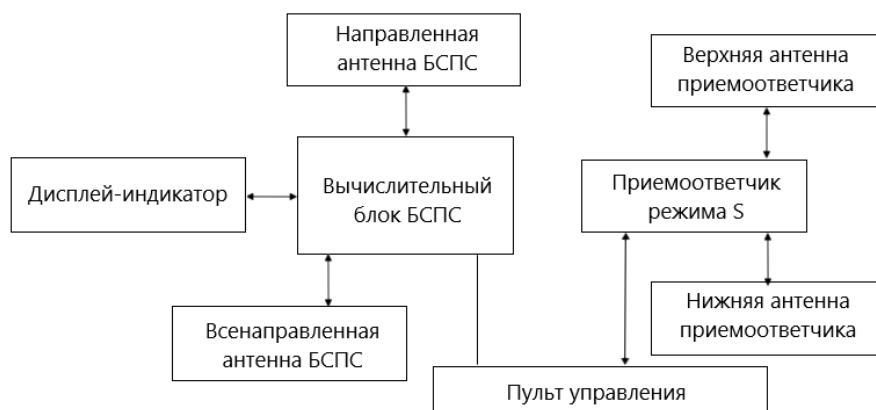


Рис. 1. Блок-схема системы БСПС

указанных недостатков, подобные системы производятся только за рубежом и имеют очень высокую стоимость. В качестве альтернативы или дополнения подобной системе, в работе предлагается использовать навигационную аппаратуру потребителя (НАП) глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), работающую в режиме относительных измерений. В случае дополнения БСПС НАП, для реализации RTK-режима (RealTimeKinematic – кинематика реального времени) возможно использовать существующие каналы связи на базе транспондеров. Практика реализации RTK-режима в геодезических приложениях, показывает, что для достижения высоких точностей относительных измерений для одночастотной аппаратуры расстояние между комплектами не должно превышать 20–25 км, а для двухчастотной аппаратуры 150–200 км. На примере самолетного ответчика СО – 96 рассчитаем дальность канала связи между двумя самолетами с учетом существующих параметров аппаратуры.

Для того, чтобы рассчитать дальность канала связи, воспользуемся инженерной формулой расчета потерь в свободном пространстве:

$$D = 10 \left(\frac{FSL}{20} - \frac{33}{20} - \log F \right), \quad (1)$$

где FSL (FreeSpaceLoss) – потери в свободном пространстве; F – центральная частота канала.

Потери в свободном пространстве вычисляются по формуле:

$$FSL = Y - SOM, \quad (2)$$

где Y – суммарное усиление системы; SOM (SystemOperatingMargin) – запас в энергетике радиосвязи.

Суммарное усиление системы рассчитывается по формуле:

$$Y = P_t + G_t + G_r - P_{\min} - L_t - L_r, \quad (3)$$

где P_t – мощность передатчика; G_t – коэффициент усиления передающей антенны; G_r – коэффициент усиления приемной антенны; P_{\min} – чувствительность приемника; L_t , L_r – потери сигнала в коаксиальном кабеле и разъемах передающего и приемного тракта соответственно.

Расчет дальности будет происходить на основе характеристик самолетного ответчика СО – 96, являющегося бортовой частью системы вторичной радиолокации и обеспечивающего решение задач управления воздушным движением на трассах и в районе аэродрома.

Мощность передатчика P_t равна 300 Вт (54,8 дБ); чувствительность приемника – 100 дБ/Вт. Коэффициенты усиления приемной и передающей антенны, согласно ГОСТ Р 50860 – 96, примем $G_t = G_r = 3$ дБ. Потери сигнала в обоих трактах примем равными 4 дБ [2].

По формуле (3) рассчитаем суммарное усиление системы:

$$Y = 54,8 + 3 + 3 - 100 - 4 - 4 = -47,2 \text{ дБ}.$$

Значение SOM стандартно принимается от 10 до 20 дБ. Считается, что 10 – децибельный запас по усилению достаточен для инженерного расчета. Центральную частоту канала F , являющуюся мерой между верхней и нижней частотами среза, при которых антенна работает эффективно, примем равной 2412 МГц [3].

Подставив значения суммарного усиления системы и запаса в энергетике радиосвязи в формулу (2), получим:

$$FSL = -47,2 - 10 = -57,2 \text{ дБ}.$$

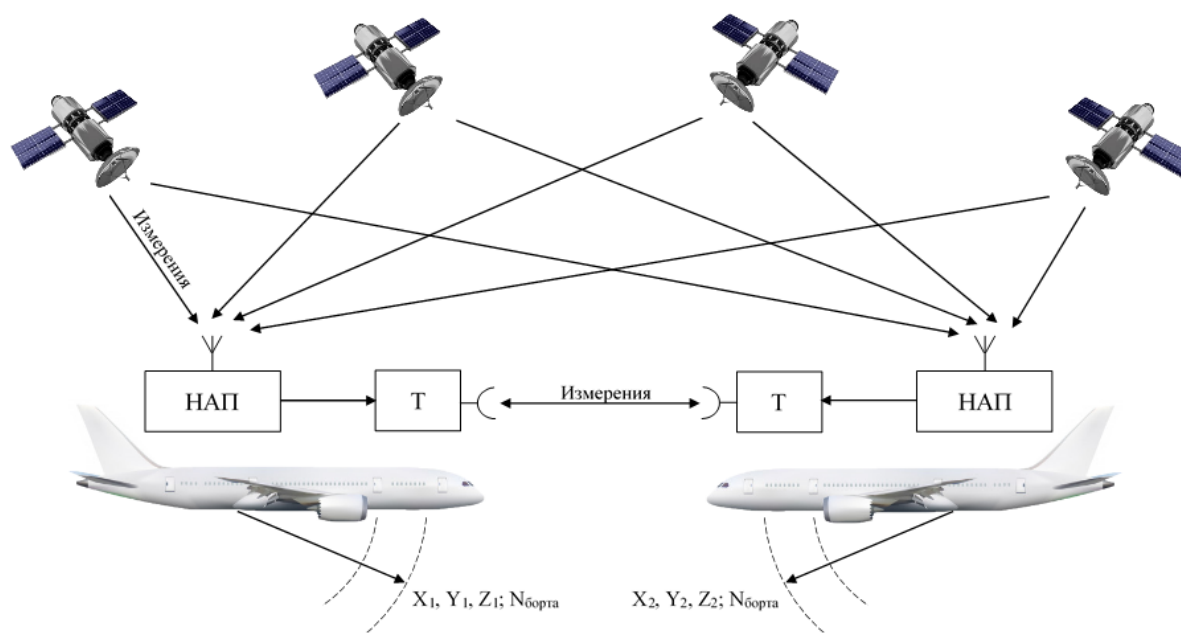


Рис. 2. Полет по маршруту

Зная все необходимые параметры, по формуле (4) рассчитаем дальность связи:

$$D = 10 \left(\frac{57,2}{20} - \frac{33}{20} - \log 2412 \right) = 21 \text{ км.}$$

Система БСПС предназначена для оповещения экипажа воздушного судна (ВС) об угрозе потенциальных столкновений с другими самолетами внутри защищаемой области радиусом около 20 км.

Расчетная дальность канала связи удовлетворяет условиям для реализации RTK-режима. Из чего можно сделать вывод о том, что транспондеры подходят в качестве передатчиков спутниковых измерений от одной навигационной аппаратуры потребителя до другой.

Обработка относительных измерений может быть применена в определении взаимного расстояния между ВС как при полете по маршруту, так и вблизи аэродромов. Особенно актуально использование высокоточных относительных измерений в районах ответственной навигации, например, при взлете и посадке. Для реализации данного метода аппаратура двух воздушных судов и диспетчер управления воздушным движением должны быть оснащены комплектами соответствующей навигационной аппаратурой потребителя (НАП), имеющий возможность обработки фазовых измерений и поддерживающий RTK-режим.

Примерная схема реализации относительных измерений по сигналам ГНСС между воз-

душными судами при полете по маршруту и в районе аэропорта представлена на рис. 2; 3.

В перечень необходимого оборудования должны входить двухчастотная навигационная аппаратура потребителя с поддержкой фазовых измерений, специальное программное обеспечение, установленное на борту воздушного судна и на диспетчерском пункте и позволяющее решать навигационную задачу в относительном режиме, прием-передатчик измерительной информации (транспондер), подключенный к каждому комплекту НАП для передачи измерений. Каждый самолет (рис. 2), оборудованный такой системой, самостоятельно выдает по радиоканалу специфическую информацию о себе (высоту полета, скорость, курс, бортовой номер и др.). Наземные станции могут комбинировать полученную информацию и ретранслировать ее для всех ВС в радиусе своего обслуживания.

При опасном сближении судов, а также в зонах ответственной навигации (рис. 3) навигационная аппаратура потребителя переходит в режим относительных фазовых измерений и реализуется RTK – режим между ВС и аэропортом. При этом диспетчерский пункт или определенная точка в аэропорту может выступать как опорный пункт, дополняющий классический RTK – режим между двумя ВС до высокоточного абсолютного режима, когда диспетчеру становятся доступны координаты и скорости каждого воздушного судна.

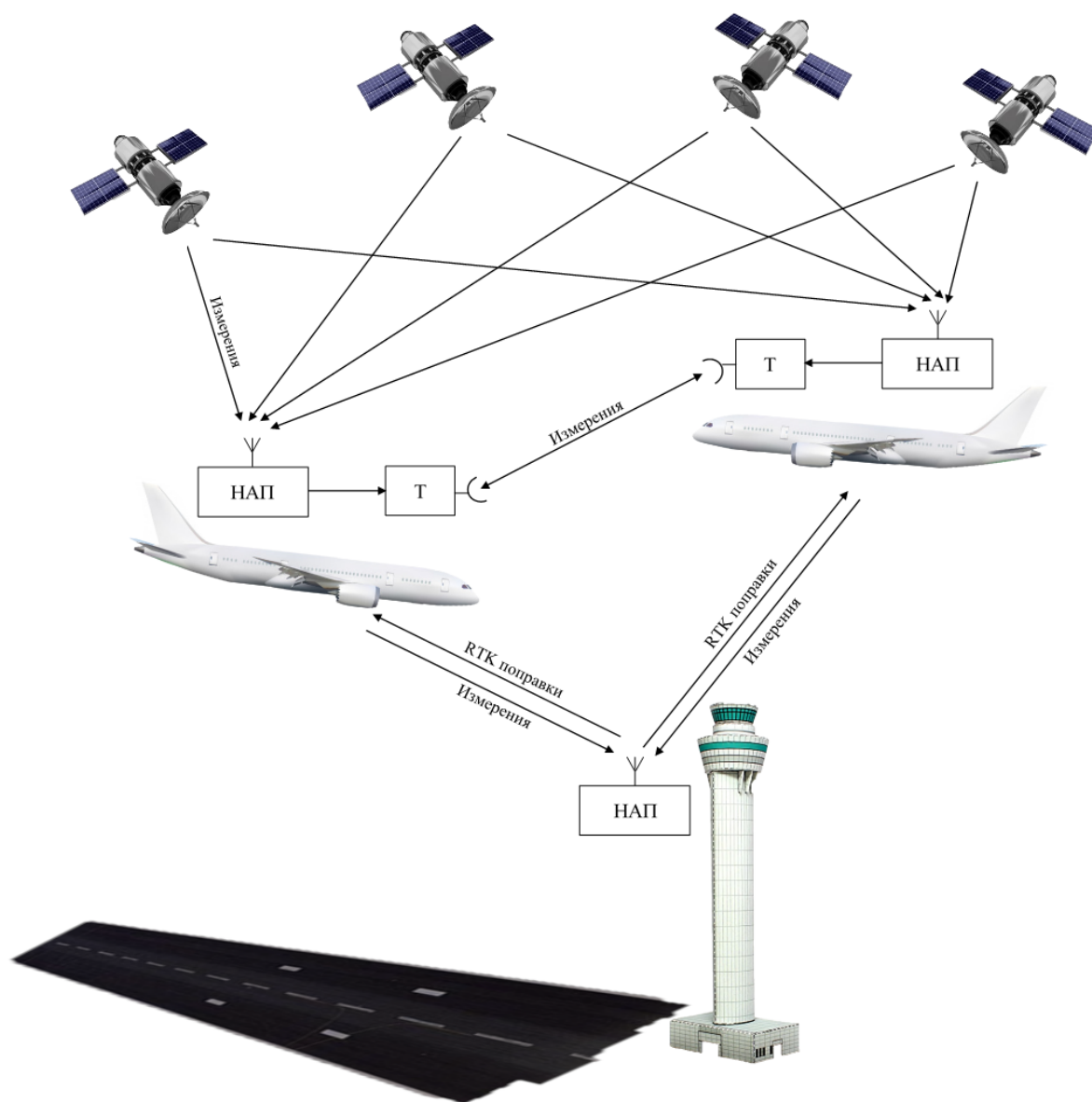


Рис. 3. Зона ответственной навигации

Таким образом, использование RTK режима работы навигационной аппаратуры потребителя ГНСС может стать перспективным направлением в развитии бортовых систем предупреждения столкновений. Такой подход позволит не только с высокой точностью определять относительные координаты и скорости воздушных судов в зонах ответственной навигации (информация используется в системах предупреждения столкновений), но и позволит организовать абсолютное высокоточное позиционирование воздушных судов в районе аэропорта для их диспетчеризации.

Библиографический список

1. Руководство по бортовой системе предупреждения столкновений (БСПС) / Международная организация гражданской авиации. 2012. 252 с.
2. ГОСТ 33472 – 2015. Глобальная навигационная спутниковая система. Аппаратура спутниковой навигации для оснащения колесных транспортных средств категорий М и N. Общие технические требования. М.: Интернавигация, 2015. 144 с.
3. Wifi-solutions. URL: https://wifi-solutions.ru/matematicheskij_raschet_dalnosti_wi-fi_signala/ (дата обращения: 25.11.2020).

УДК 550.388.2

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-244-247

В. И. Тимофеев*

кандидат технических наук, доцент

Н. А. Овчинникова*

кандидат технических наук

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС/GPS

Представлен краткий анализ влияния вариаций состояния атмосферы (тропосферы и ионосферы) на прохождение сигналов спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS, а также условия формирования тропосферных и ионосферных задержек в процессе распространения радиосигнала через атмосферу Земли от навигационных спутников к наземной аппаратуре потребителя.

Ключевые слова: тропосфера, ионосфера, спутниковые радионавигационные системы, тропосферная задержка сигнала, ионосферная задержка сигнала, гидрометеоры, литометеоры, полная электронная концентрация, наземная аппаратура потребителя.

V. I. Timofeev*

PhD, Tech., Associate Professor

N. A. Ovchinnikova*

PhD, Tech.

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FLUCTUATIONS OF ATMOSPHERIC PARAMETERS ON THE PROPAGATION OF SIGNALS FROM GLONASS / GPS SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS

The article presents a brief analysis of the influence of variations in the state of the atmosphere (troposphere and ionosphere) on the passage of signals from the GLONASS / GPS satellite radio navigation systems, as well as the conditions for the formation of tropospheric and ionospheric delays in the process of radio signal propagation through the Earth's atmosphere from navigation satellites to the consumer's ground equipment.

Keywords: troposphere, ionosphere, satellite radio navigation systems, tropospheric signal delay, ionospheric signal delay, hydrometeors, lithometeors, total electron concentration, consumer ground equipment.

Введение

Радионавигационные сигналы, передаваемые навигационными космическими аппаратами (КА), входящими в состав спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС/GPS, проходят через атмосферу Земли к наземной аппаратуре потребителя (НАП), расположенной на земной поверхности, акватории океана или в воздушном пространстве. Распространяясь в атмосфере Земли, радиоволны взаимодействуют с молекулами газов, с заряженными и нейтральными частицами, в результате чего происходит некоторое изменение направления их распространения и частичное поглощение энергии волн средой. По этой причине состояние атмосферы Земли является одним из ключевых факторов, который оказывает значитель-

ное влияние на точность координатно-временной привязки локализации наземных (надводных, подводных и воздушных) объектов с использованием сигналов СРНС ГЛОНАСС/GPS.

С точки зрения особенностей распространения радиосигналов атмосферу Земли условно подразделяют на 2 области: тропосферу (от поверхности Земли до высот 10–15 км) и ионосферу (от 60 км и до высот (15–20)·10³ км) [1]. Соответственно, влияние атмосферы на точность координатно-временной привязки описывается посредством двух видов поправок: тропосферной и ионосферной.

Краткий анализ влияния тропосферы на распространение радиосигнала

В тропосфере сосредоточены почти $\frac{3}{4}$ массы атмосферы Земли и почти весь содержащий-

ся в ней водяной пар. В тропосфере постоянно протекают сложные процессы термического нагрева различных типов подстилающей поверхности (ПП), турбулентного перемешивания тропосферного воздуха и перемещения воздушных масс в вертикальном (конвекция) и в горизонтальном (адвекция) направлениях, а также и формирование погодных условий вследствие фазовых переходов воды (конденсация водяного пара, образование облачности различных ярусов (нижнего (до 2 км), среднего (до 6 км), верхнего (до 12 км)) и осадков различного происхождения (мороси, дождя, снега, града и др.). Поэтому процесс распространения радиоволн в тропосфере зависит от основных физических параметров ее состояния (температуры, влажности, давления, плотности и др.), интенсивности протекающих в ней атмосферных процессов, характера взаимодействия радиоволн с содержащимися в ней неоднородностями.

Влияние тропосферы на процесс распространения радиоволн приводит к искривлению (рефракции) направления их распространения, рассеянию радиоволн за счет их взаимодействия с неоднородностями тропосферы, поглощению энергии радиоволн и их рассеянию литометеорами (частицами пыли, дыма, копоти и т. п.) и

гидрометеорами (каплями воды, кристаллами снега и льда и т. п.).

Явление рефракции радиоволн в тропосфере связано с изменением диэлектрической проницаемости тропосферы и, следовательно, с изменением показателя преломления радиоволн с высотой [2].

Неоднородности в тропосфере непрерывно образуются вследствие постоянно существующего турбулентного движения воздуха, в результате которого происходит локальное повышение температуры окружающего воздуха. Это, в свою очередь, приводит к появлению инверсий и изотермий в тропосфере, представляющих собой достаточно «тонкие» слои воздуха, в которых вертикальный градиент температуры положителен (инверсии) или постоянен (изотермии). Они и представляют собою те неоднородности в тропосфере, на которых происходит уменьшение диэлектрической проницаемости и изменение показателя преломления радиоволн N . Для данных неоднородностей характерны квазипостоянные вариации их параметров (горизонтальных и вертикальных размеров, градиента температуры в их пределах). Кроме того, они подвержены постоянному дрейфу в соответствии с направлением преобладающих ветров

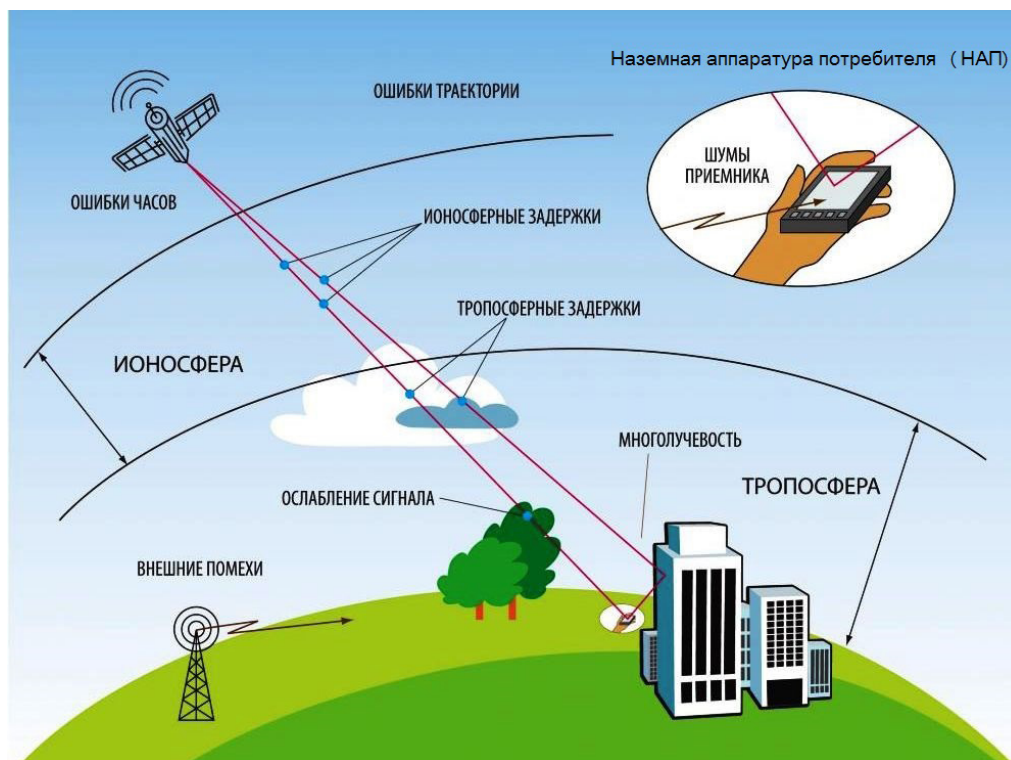


Рис. 1. Схематизация условий возникновения тропосферных и ионосферных задержек в процессе распространения радиосигнала от навигационных КА СРНС ГЛОНАСС/GPS к НАП

на тех или иных высотах в тропосфере. Размеры тропосферных неоднородностей, рассеивающих радиоволны, соизмеримы с длиной волны λ .

Влияние тропосферы на распространение радиоволн зависит, в основном, от тропосферной рефракции, вследствие чего возникает тропосферная задержка сигнала, которая, в свою очередь, зависит от температуры, влажности и давления тропосферного воздуха, а также изменяется в зависимости от высоты расположения НАП (рис. 1).

Показатель преломления N определяют через индекс показателя преломления n , а именно: $N = (n-1) \cdot 10^{-6}$. Исходя из этого, тропосферную задержку сигнала можно представить следующим образом:

$$T_R^S = \int_R^S c N dt. \quad (1)$$

Интегрирование производится вдоль пути сигнала от спутника S к приемнику R .

Показатель преломления воздуха для электромагнитных волн, используемых в спутниковых системах определения местоположения, зависит от основных физических параметров (метеорологических величин), характеризующих состояния тропосферы, т. е. температуры возду-

ха T , давления P и влажности воздуха (парциального давления водяного пара) e :

$$N = f(T, P, e). \quad (2)$$

Показатель преломления N является функцией положения точек в пространства, через которые проходит сигнал (его траектории распространения).

Пространственное распределение полей основных физических параметров (метеорологических величин) в тропосфере является весьма неоднородным, особенно вблизи земной поверхности. Поэтому, для вычисления пути, пройденного радиосигналом КА, необходимо знать действительный (истинный) средний показатель преломления среды вдоль траектории его распространения.

Действительный средний показатель преломления n теоретически определяется следующим выражением:

$$N = \frac{1}{S} \int_0^S N(x) dx. \quad (3)$$

Это равенство предполагает, что функция $N(x)$, зависящая от пути (траектории) сигнала x , известна. Она может быть определена только при наличии достоверных результатов измере-

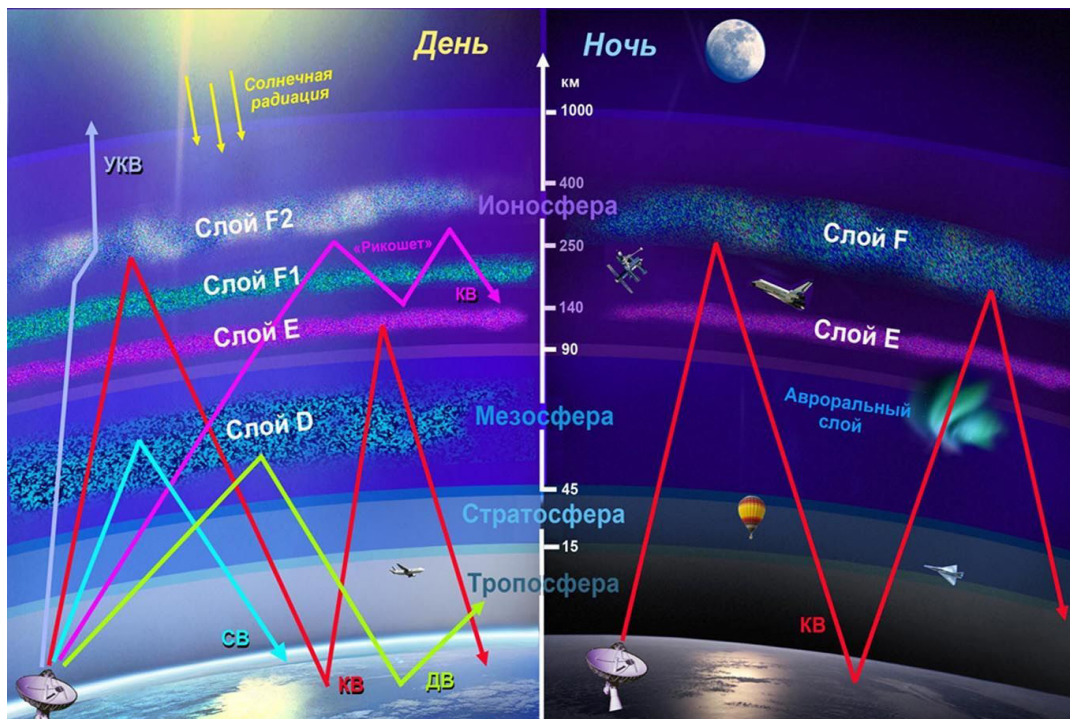


Рис. 2. Отражательные слои ионосферы и характер распространения ультракоротких и коротких волн в зависимости от времени суток

ний основных физических параметров (метеорологических величин) в тропосфере [2].

Краткий анализ влияния ионосферы на распространение радиосигнала

Ионосфера Земли представляет собой область ионизированных газов (свободных электронов и ионов), которая распространяется от высот около 60 км до высот порядка 1500 км. Ионизация вызывается солнечной радиацией, и состояние ионосферы определяется преимущественно интенсивностью солнечной активности. Ионосфера состоит из отдельных слоев (D, E, F1, F2), расположенных на различных высотах, каждый из которых характеризуется интенсивностью образования и потери свободных электронов. Максимум электронной плотности приходится на диапазон высот 250–400 км (слой F2) [3].

Физические характеристики ионосферы варьируют существенным образом в течение суток (рис. 2).

С восходом Солнца под воздействием ультрафиолетового излучения начинается процесс диссоциации молекул газа (в основном H_2 и H_e на больших высотах, а на меньших высотах – O_2 и N_2) на ионы и свободные электроны. Максимум электронной плотности достигается в послеполуденные часы, а затем плотность вещества начинает постепенно уменьшаться. В ночное время процесс ионизации прекращается. Ионы и электроны рекомбинируют, уменьшая количество свободных электронов.

Ионосферные измерения фиксируют значительные вариации состояния ионосферы в зависимости от времени года, времени суток, солнечной активности и возмущений геомагнитного поля Земли (особенно в период солнечных вспышек). Существуют также спорадические краткосрочные вариации состояния ионосферы, вызывающие возникновение подвижных локальных аномалий (естественных ионосферных образований).

Скорость распространения радиосигналов в ионосфере зависит от числа свободных электронов на пути их следования, определяемых величиной полной электронной концентрации TEC (Total Electron Content) [4], представляющей собой число электронов, содержащихся в столбе атмосферного воздуха сечением в 1 м^2 , простирающемся от приемника до спутника:

$$TEC = \int_R^S n_e(S) dS, \quad (4)$$

где $n_e(S)$ – переменная электронная плотность вдоль траектории распространения сигнала.

Длина пути через ионосферу самая короткая в направлении зенита, и поэтому ТЕС имеет минимальное значение в вертикальном направлении (TECV). Величина ТЕС измеряется в единицах TECU (TEC Units), определяемых как 10^{16} эл/м². Обычно TECV изменяется в пределах 1–150 TECU. В данном месте и в данное время TECV может изменяться на 20–25% по отношению к его среднемесячному значению. Современные модели ионосферы не обеспечивают адекватное представление изменений в ТЕС от суток к суткам.

Таким образом, атмосфера Земли представляет собой чрезвычайно сложную газодинамическую систему, которая подвержена внешним воздействиям, и по этой причине является термодинамически незамкнутой и нестационарной. Ввиду этого, атмосфера оказывает существенное влияние на точность определения координат при использовании СРНС и в бюджете ошибок занимает первое место. По оценкам из разных источников, в среднем, для одностороннего режима НАП тропосфера вносит ошибку по дальности ~0,7 м, а ионосфера ~7,0 м. Предполагается, что диапазон ошибок по дальности из-за вклада ионосферы может составлять значения 4,5–50 м, а тропосферы – 2–23 м, в зависимости от времени суток, солнечной активности, геомагнитной активности, широты, угла визирования навигационного КА и некоторых других факторов.

Библиографический список

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн в ионосфере. М.: Наука, 1972.
2. Влияние тропосферы на распространение радиоволн. URL: https://studopedia.ru/19_258042_glava-vliyanie-troposferi-na-rasprostranenie-radiovoln.html (дата обращения: 12.10.2020).
3. Большая советская энциклопедия: Ионосфера. URL: <http://www.worklib.ru/dic/Ионосфера/> (дата обращения: 12.10.2020).
4. Студопедия: Учет влияния ионосферы. URL: http://studopedia.ru/4_165018_uchet-vliyaniya-ionosferi.html/ (дата обращения: 12.10.2020).

УДК 550.388.2

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-248-254

В. И. Тимофеев*

кандидат технических наук, доцент

Н. А. Овчинникова*

кандидат технических наук

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СПОСОБЫ УЧЕТА СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ТОЧНОСТЬ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОЙ ПРИВЯЗКИ НАЗЕМНЫХ И ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС/GPS

Приведен сравнительный анализ способов учета фактического состояния ионосферы в одночастотной и двухчастотной наземной аппаратуре потребителя с целью оперативного формирования тропосферных и ионосферных поправок на основе радионавигационных измерений, проводимых на сети контрольно-корректирующих станций российской системы дифференциальной коррекции и мониторинга.

Ключевые слова: спутниковые радионавигационные системы, состояние ионосферы, ионосферная поправка, контрольно-корректирующие станции, ошибки определения псевдодальностей, глобальная сетка SBAS, система дифференциальной коррекции и мониторинга, фоновая модель ионосферы.

V. I. Timofeev*

PhD, Tech., Associate Professor

N. A. Ovchinnikova*

PhD, Tech.

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

METHODS OF ACCOUNTING FOR THE STATE OF THE IONOSPHERE FOR THE ACCURACY OF THE COORDINATE-TIME REFERENCING OF GROUND AND AIR OBJECTS USING SIGNALS FROM SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS GLONASS / GPS

The article presents a comparative analysis of the methods of accounting for the actual state of the ionosphere in single-frequency and dual-frequency ground-based equipment of the consumer in order to promptly generate tropospheric and ionospheric corrections based on radio navigation measurements carried out on the network of control and correcting stations of the Russian system of differential correction and monitoring.

Keywords: satellite radio navigation systems, state of the ionosphere, ionospheric correction, control and correction stations, errors in determining pseudo-ranges, SBAS global grid, differential correction and monitoring system, ionospheric background model.

В зависимости от времени суток, широты расположения наземной аппаратуры потребителя (НАП), солнечной активности и угла места космического аппарата (КА) ошибки определения дальности до КА, обусловленные состоянием ионосферы, составляют значения от единиц до сотен метров. Ошибки определения координат по масштабу соизмеримы с ошибками определения псевдодальностей до КА.

Ошибки местоположения, зависящие от состояния ионосферы, подразделяются на регулярные (обусловленные, например, суточным ходом параметров ионосферы) [1, 2]) и нерегулярные (обусловленные, например, геомагнит-

ными и авроральными эффектами [3, 4]). Перечисленные явления вызывают волновые процессы различного пространственно-временного масштаба в полях температуры и концентрации заряженных компонент в Е- и F-слоях ионосферы. Это, в свою очередь, влияет на характеристики радионавигационных сигналов.

Значения нерегулярных ошибок измерения псевдодальностей во время геомагнитных бурь могут достигать десятков метров [5]. Так, в литературе приводятся оценки максимального изменения TEC (Total Electron Content) в области затмения, составляющие по величине 7÷10 TECU в вертикальном направлении и до

40 TECU (TEC Units) под малыми углами [6]. Что касается регулярных ошибок, то в области ионосферного провала, который постоянно наблюдается в высоких широтах (как правило, между 65° и 75°), ТЕС в дневное время на 20–40% ниже, чем в окружающих областях ионосферы. В ночное время ионосферный провал выражен в еще большей степени [7]. В настоящее время нерегулярные и часть регулярных (таких как главный ионосферный провал) вариации ТЕС при решении навигационных задач не учитываются.

Таким образом, в возмущенных условиях погрешности определения дальности, доплеровского смещения частоты и углов прихода радиоволн в спутниковую радионавигационную систему (СРНС), которые обусловлены ионосферой, превышают соответствующие показатели для спокойных условий как минимум в 2–10 раз [8]. Области возмущений в ионосфере имеют региональный масштаб и в рамках глобальных моделей ионосферы не описываются. Поэтому при расчетах ионосферных поправок целесообразно пользоваться измерениями состояния ионосферы на пунктах, размещенных в различных регионах страны.

Следует отметить, что учет состояния ионосферы в двухчастотных НАП также связан с рядом проблем. Как известно, ТЕС пропорционально разности групповых путей сигналов на различных частотах. Рассчитав ТЕС, например, по разности измеренных псевдодальностей, возможно определить ошибку определения псевдодальности. Данную ошибку можно вычесть из измеренных псевдодальностей и затем более корректно решить навигационную задачу. Однако значения ТЕС, вычисляемые таким образом, существенно зашумлены. Вариации ТЕС могут достигать 20 TECU. В этих условиях ошибка определения координат двухчастотным способом, только из-за ионосферного фактора, не может быть меньше 2 м [1]. Поэтому разработку способов учета состояния ионосферы в целях повышения качества координатно-временного обеспечения необходимо проводить наряду с разработкой способов компенсации других неблагоприятных факторов. Необходимость учета состояния ионосферы особенно актуальна при использовании одночастотных НАП.

Существует несколько способов учета состояния ионосферы в одночастотных НАП.

Первый способ основан на использовании зависимости среднего в течение года ТЕС от широты расположения НАП, местного времени и угла места КА. Такая модель используется в алгоритмах одночастотного определения координат

некоторых НАП отечественных производителей, использующих сигналы системы ГЛОНАСС. В среднем такой способ обеспечивает учет около 30% погрешностей, обусловленных влиянием ионосферы.

Второй способ основан на использовании подобной зависимости, но в нем дополнительно используются данные о фоновом состоянии ионосферы, передающиеся с навигационных КА. Так в навигационном сообщении системы GPS передаются параметры глобальной модели ионосферы – модели Клобушара, на основе которой в одночастотных НАП осуществляется ионосферная коррекция. Согласно интерфейсному контрольному документу GPS, применение модели Клобушара позволяет уменьшить влияние ионосферы на среднеквадратическую ошибку определения положения НАП КНС на 50%. Среднеквадратическая погрешность модели Клобушара составляет 7 м [9].

В системе GPS параметры модели Клобушара действуют, как правило, в течение нескольких дней, что не позволяет учитывать региональные особенности ионосферы, обусловленные, например, магнитными бурями.

Третий способ реализуется в рамках использования систем дифференциальной навигации. Принцип дифференциальных навигационных измерений состоит в следующем: опорный приемник СРНС располагается в пункте с известными координатами (так называемая контрольно-корректирующая станция, ККС). Сравнивая известные координаты с измеренными, ККС вырабатывает поправки, которые затем передаются по каналу связи в НАП потребителей.

В настоящее время в России создана и функционирует Система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), центральным элементом которой является Центр глобального мониторинга (ЦГМ). Данная система по своей сути является широкодиапазонной системой дифференциальной навигации.

ККС данной системы используют двухдиапазонную (L_1 , L_2) ГЛОНАСС/GPS аппаратуру. Это позволяет определять значения ТЕС над каждой из станций системы ККС. С использованием значений ТЕС, рассчитанных для мест расположения ККС, и интерполируя особым образом параметры, характеризующие состояние ионосферы, возможно весьма точно определять ионосферные составляющие вертикальной задержки в заданных точках.

Значения вертикальных составляющих ионосферной задержки рассчитываются для узлов регулярной сетки SBAS (Satellite-based Augmentation System), показанной на рис. 1.

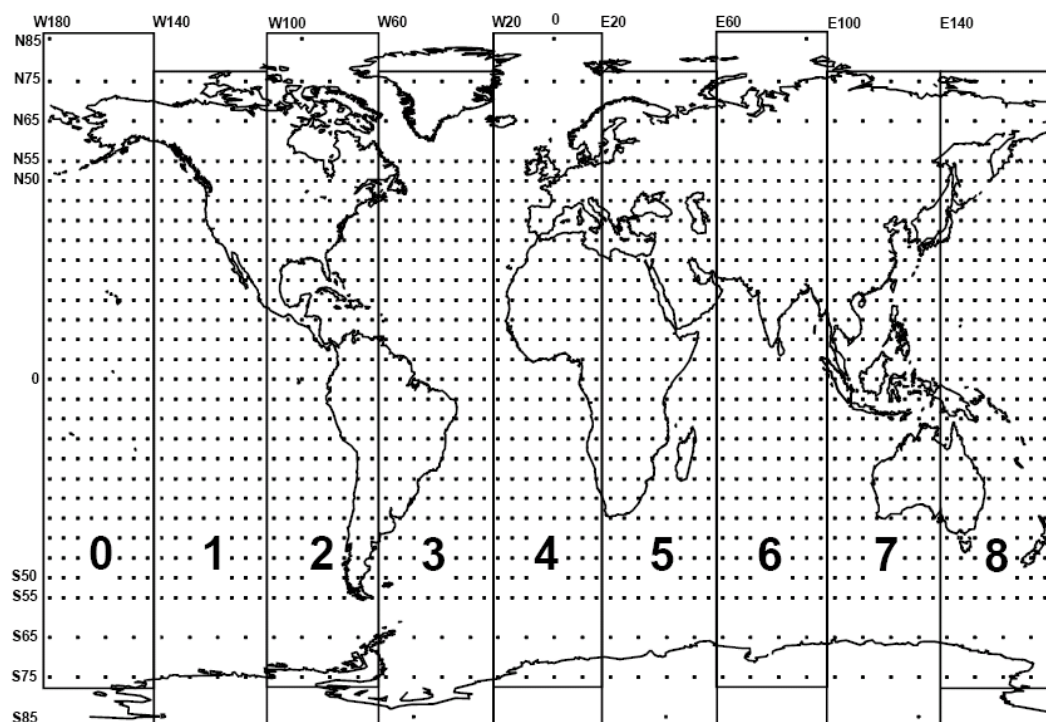


Рис. 1. Карта глобальной сетки SBAS

Далее данные задержки могут распространяться потребителям в рамках системы дифференциальной навигации с помощью средств связи, например, через геостационарные КА или сеть Интернет.

Сущность технологии расчета вертикальных ионосферных задержек, реализуемая в рамках Центра системы дифференциальной коррекции и мониторинга следующая.

В узлах хаотической сетки (определяются размещением средств измерения параметров ионосферы), охватывающей территорию РФ, осуществляется определение ионосферного индекса солнечной активности (ИИСА). Ионосферный индекс солнечной активности может определяться на основе измерений, выполненных на контрольно-корректирующих станциях. В этом случае, ИИСА численно равен значению входного параметра фоновой модели ионосферы, при котором рассчитанное по фоновой модели значение ТЕС равно значению ТЕС, рассчитанному по радионавигационным измерениям на двух частотах (L_1 , L_2). Ионосферный индекс солнечной активности также может определяться на основе данных, полученных от пунктов определения состояния ионосферы (например, пунктов вертикального зондирования ионосферы). В этом случае значения индекса определяются по известной функциональной зависимости между

значением индекса и параметрами, измеряемыми на данных пунктах (например, критической частоты максимума F_2 -слоя ионосферы). Чем больше будет узлов хаотической сетки, в которых определяется текущее значение ИИСА, тем точнее будет учитываться региональное состояние ионосферы при определении ионосферных задержек. Далее осуществляется интерполяция значений ИИСА в узлы регулярной сетки SBAS над территорией России. По значениям индекса в узлах регулярной сетки с использованием фоновой модели ионосферы рассчитываются значения вертикального ТЕС и вертикальных задержек радионавигационного сигнала на заданной частоте в заданном узле.

Источниками информации о состоянии ионосферы и солнечной активности являются: контрольно-корректирующие станции (измеряют ТЕС), станции вертикального и наклонного зондирования ионосферы (измеряют f_oF_2 – критическую частоту слоя F_2 ионосферы), средства трансionoсферного зондирования ионосферы (измеряют ТЕС), оптические и радиотелескопы (индексы солнечной активности). Результаты измерений данными средствами являются входными параметрами некоторой фоновой модели ионосферы, являющейся интерполянт (аппроксимант) значений ионосферного индекса солнечной активности в узлы сетки

SBAS. С использованием фоновой модели и значения (проинтерполированного в заданную точку) входного параметра (ИИСА) рассчитывается полное электронное содержание и ионосферная составляющая вертикальной задержки.

Таким образом, данный подход обеспечивает учет региональных особенностей состояния ионосферы путем адаптации фоновой модели ионосферы к данным реальных измерений.

Важной особенностью данного подхода является тот факт, что адаптация фоновой модели ионосферы будет возможна даже при прекращении работы всех каналов связи, обеспечивающих сбор данных измерений, путем использования в качестве параметров адаптации модели индексов солнечной активности, получаемых с помощью оптических (W – число Вольфа) или радиотелескопов ($F_{10.7}$ – поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см). На рис. 2 приведена схема расположения пунктов сбора информации о состоянии ионосферы. Пункты включают контрольно-корректирующие станции в следующих городах РФ: Кисловодск (43,9° с. ш., 43,7° в. д.), Иркутск (52,2° с. ш., 104,3° в. д.), Норильск (69,3° с. ш., 88,4° в. д.), Новосибирск (55,0° с. ш., 82,9° в. д.), Москва (55,7° с. ш., 37,7° в. д.), Санкт-Петербург (59,7° с. ш., 30,3° в. д.), Петропавловск-Камчатский (53,0° с. ш., 158,0° в. д.).

Как видно, использование только ККС не позволяет оценить текущее состояние ионосферы в ряде регионов. Поэтому целесообразно привлекать информацию о состоянии ионосферы с внешних относительно ГЛОНАСС источников.

Для примера на данном рисунке также обозначены станции вертикального зондирования ионосферы Росгидромета. Это следующие пункты: Санкт-Петербург, Москва, Иркутск, Петропавловск-Камчатский, Магадан (60,0° с. ш., 151,0° в. д.), Томск (56,5° с. ш., 84,9° в. д.), Свердловск (56,4° с. ш., 58,6° в. д.), Хабаровск (48,5° с. ш., 135,1° в. д.), Подкаменная Тунгуска (62,0° с. ш., 90,2° в. д.). Как видно, использование информации с данных станций существенно улучшит описание текущего состояния ионосферы в регионах страны, где отсутствуют ККС. Вся информация со средств сбора должна поступать в Центр системы дифференциальной коррекции и мониторинга, который должен располагать:

- средствами приема, обработки и анализа данных о состоянии ионосферы;
- средствами аппроксимации состояния ионосферы и вычисления ионосферной составляющей вертикальных задержек для радиосигналов СРНС;
- средствами передачи потребителям данных о ионосферной составляющей вертикальных задержек для радиосигналов СРНС.



Рис. 2. Схема расположения пунктов сбора информации о состоянии ионосферы

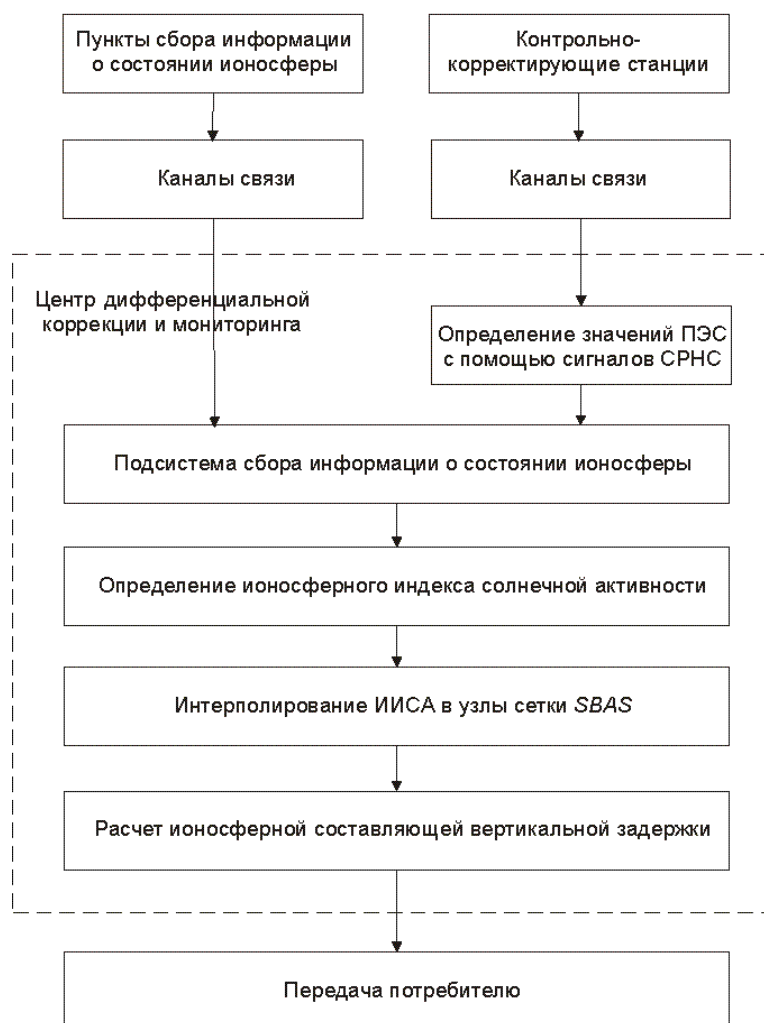


Рис. 3. Схема системы формирования ионосферной составляющей вертикальной задержки в узлах сетки SBAS

Общая схема системы формирования ионосферной составляющей вертикальной задержки в узлах сетки SBAS показана на рис. 3.

Источниками данных в системе являются пункты сбора информации о состоянии ионосферы (станции вертикального зондирования ионосферы) и контрольно-корректирующие станции. Подсистема сбора информации обеспечивает первичную обработку поступившей информации. Далее определяется ионосферный индекс и интерполируются его значения в узлы сетки SBAS. С учетом частоты сигнала и значений TEC, рассчитанных на основе значений ИИКА в узлах сетки SBAS, определяются вертикальные задержки. Ряды вертикальных задержек передаются потребителю. Средства расчетов вертикальных составляющих ионосферной задержки структурно и функционально входят в Центр дифференциальной коррекции и мониторинга.

Следует отметить, что для решения требуемой задачи, а именно описания состояния ионосферы над территорией РФ при малом числе исходных данных (6–10 контрольно-корректирующих станций), единственным возможным вариантом ионосферного обеспечения является использование адаптивных фоновых моделей ионосферы.

Сформируем требования для фоновой модели ионосферы, исходя из задач, требующих решения. Фоновая модель ионосферы должна удовлетворять следующим требованиям:

- глобальности (вся территория РФ);
- возможности вычисления полного электронного содержания;
- возможности адаптации по фактическим измерениям;
- возможности учета широтных особенностей распределения TEC;

- возможности учета суточного хода параметров ионосферы;
- возможности использования малого числа входных параметров;
- диапазон описываемых высот должен включать толщину от нижней границы ионосферы (около 60 км) до высоты 20 000 км;
- возможности учета региональных особенностей ионосферы.

Таким образом, задача разработки средств автоматического формирования ионосферных поправок в рамках Российской системы дифференциальной коррекции и мониторинга является весьма актуальной.

Для определения параметров ионосферы, используя сигналы спутниковых систем, необходимо решить так называемую обратную задачу – на основе анализа радионавигационных сигналов, являющихся носителями информации о среде их распространения, определять параметры среды, через которую они распространялись.

Как известно, в трехмерной неоднородной магнитоактивной плазме волновое уравнение не имеет строгих решений, и, поэтому, для описания связи сигнальных характеристик с параметрами ионосферы необходимо использовать приближения (упрощения) волнового уравнения. Применительно к измерениям ТЕС удовлетворительные результаты дает приближение геометрической оптики, когда фазовый путь сигнала

можно представить в виде $L = \int_R^K n(S) dS$, где R

и K – точки расположения приемника и передатчика (НКА); $n(S)$ – показатель преломления (рефракционный индекс); dS – элемент длины

радиолуча. Обозначим $L_0 = \int_R^K dS_0$ – оптический

путь (в приближении $n = 1$), где dS_0 – элемент прямой линии, соединяющей R и K [10]. Можно записать:

$$L = L_0 + S_1 + S_2, \quad (1)$$

где

$$S_1 = \int_R^K n ds_0 - \int_R^K ds_0; \quad S_2 = \int_R^K n ds - \int_R^K n ds_0.$$

Очевидно, что S_1 определяет разность фазового пути от оптической длины, обусловленную отличием фазовой скорости волны от скорости света, а S_2 – обусловленную рефракцией.

Пренебрегая вкладом ионов и столкновениями частиц, показатель преломления в квази-

продольном приближении можно записать в известном виде [11]:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 \pm Y_L - Y_T^2 / 2}. \quad (1)$$

Знаки « \pm » соответствуют разным магнитно-ионным компонентам волны, членом $Y_T^2 / 2$ чаще всего пренебрегают. Приняты обозначения: $X = f_p^2 / f^2$, $Y = f_g / f$, $f_p^2 = AN_e$, где: f_p – плазменная частота, f_g – гирочастота электронов. $Y_L = Y |\cos \theta|$, $Y_T = Y \sin \theta$, где θ – угол между направлением луча и вектором геомагнитной индукции, $A \approx 80,6$ в системе СИ. Использование квазипродольного приближения является приемлемым упрощением и для частот радиосигналов при $f > 100$ МГц. Данное упрощение неприемлемо лишь в узком диапазоне значений углов места КА (θ в диапазоне $(\pm 1)^\circ$ около $\theta = 90^\circ$). Используя разложение в ряд и ограничиваясь первыми членами, получим:

$$n = 1 - \frac{1}{2} X \pm \frac{1}{2} XY_L - \frac{1}{8} X^2 - \frac{1}{4} (Y_T^2 + 2Y_L^2). \quad (2)$$

Если рассчитывать S_1 , то, имея в виду, что dS_0 – элемент прямого луча, можно заменить его на $dh / \cos \beta$, где β – зенитный угол вдоль прямой линии RK . В соотношении (2) четвертый и пятый члены пропорциональны – 4 степени частоты и в задачах идентификации состояния ионосферы ими пренебрегают. Далее, с учетом упрощения, можно подставить соотношение (2) в следующее соотношение:

$$\begin{aligned} S_1 &= \int_R^K n ds_0 - \int_R^K ds_0 \approx \int_R^K \left(\frac{1}{2} X \pm \frac{1}{2} XY_L \right) ds_0 = \\ &= \int_R^K \frac{1}{2} X ds_0 + \int_R^K \pm \frac{1}{2} XY_L ds_0 = S'_1 + S''_1. \end{aligned} \quad (3)$$

При этом

$$S'_1 = -\frac{1}{2} \int_R^K X ds_0 = -\frac{A}{2f^2} \int_R^K \frac{N_e}{\cos \beta} dh. \quad (4)$$

Вынося $\cos \beta$ за интеграл, заменив его некоторым средним значением $\cos \beta = \cos \chi$, где χ – зенитный угол «средней высоты ионосферы» h_i . При исследованиях ионосферы принято выбирать $h_i \approx 400$ км или $h_i = h_0 + 50$ км, где h_0 – высота максимума электронной концентрации (N_e) слоя F2. Иногда также пользуются понятием высоты «центра тяжести» ионосферы:

$$h_i = \frac{\left(\int_0^{h_s} \frac{N_e h}{\cos \beta} dh \right)}{\left(\int_0^{h_s} \frac{N_e}{\cos \beta} dh \right)}. \quad (5)$$

Координаты пересечения луча с вертикалью на высоте h_i называют координатами подионосферной точки. Именно к этим координатам относятся полученное значение ТЕС.

Таким образом:

$$S'_1 = -\frac{A}{2f^2} \sec \chi I. \quad (6)$$

Второй член (3) равен:

$$S''_1 = \pm \frac{A}{2f^2} \frac{\bar{f}_g}{f} |\overline{\cos \theta}| \sec \chi I. \quad (7)$$

Это выражение справедливо для сигнала с круговой поляризацией. В северном полушарии знак «+» соответствует левосторонней, а знак «-» соответствует правосторонней круговой поляризации.

Таким образом, ошибка (S_1) измерения дальности до КА будет зависеть от полного электронного содержания ионосферы (I).

Существует возможность определения ТЕС на основе измерений разности групповой задержки (Δt_{gp}) сигнала на двух частотах. Легко показать, что правомерно приближение

$$\Delta t_{gp} = D \sec \chi I, \quad (8)$$

где $D = \text{const}$ для заданных частот.

Приведенные соотношения (6), (7) и (8) определяют связь характеристик сигнала и ТЕС. Эти соотношения являются основными и широко используются в практике ионосферных исследований уже более 30 лет.

Полное электронное содержание определяется по фазовым и кодовым измерениям сигналов спутниковых радионавигационных систем.

Таким образом, используя данные измерений радионавигационных сигналов СРНС, принципиально возможно решить задачу мониторинга состояния ионосферы.

Библиографический список

1. Сомских В. М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1983. 192 с.
2. Somsikov V. M. On the mechanism of formation of atmospheric inhomogeneties in the solar terminator region // J. Atmos. and Terr. Phys. 1995. № 57. P. 75–83.
3. Hunsucker R. D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere // A review// Review of Geophysics. 1982. Vol. 20. P. 293–315.
4. Мусатенко С. И. и др. Возмущения в ионосфере и атмосфере вызванные солнечным затмением 11 августа 1999 г. // Геомагнетизм и Аэрономия. 2006. Т. 46, № 1. С. 78–87.
5. Афраймович Э. Л. и др. Среднеширотные амплитудные мерцания сигналов GPS и сбои функционирования GPS на границе аврорального овала // Известия вузов. Радиофизика. 2004. № 7. С. 509–525.
6. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global positioning system: theory and practice. Wien; New York. Springer-Verlag, 1992. 327 p.
7. Харгривс Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Введение в физику околоземной космической среды. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 352 с.
8. Афраймович Э. Л., Караченцев В. А. Погрешности функционирования спутниковых радиотехнических систем, обусловленные состоянием трансионосферного радиоканала. 2004. URL: <http://zhurnal.apr.relarn.ru/articles/2003/202.pdf> (дата обращения: 15.11.2020).
9. Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. 2001. October.
10. Мальцева О. А., Родионова В. Т., Шлюпкин А. С. Использование полного электронного содержания для текущей диагностики состояния ионосферного канала // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 4. С. 480–486.
11. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: ФИЗМЛ, 1960. 550 с.

УДК 629.7.052

В. И. Тимофеев*

кандидат технических наук, доцент

А. С. Слюсаренко*

кандидат технических наук, доцент

Е. А. Пузий*

аспирант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МЕТОД РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ АВИАЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И ОПТИКО-ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ

Рассмотрен один из инженерных методов оценивания дальности действия радиолокационных и оптико-локационных средств обнаружения и опознавания наземных и воздушных объектов (летательных аппаратов) при наличии ограниченного числа входных параметров в моделях ослабления электромагнитного излучения в радиодиапазоне и в оптическом диапазоне в условиях реальной атмосферы с учетом эксплуатационно-технических характеристик систем наблюдения. В основу предлагаемого метода положен итерационный подход и сравнение дальностей действия данных систем наблюдения в реальных и в идеальных условиях атмосферы.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, идеальная атмосфера, реальная атмосфера, метеорологическая дальность видимости, дальность действия радиолокационных и оптико-локационных систем, уравнение дальности радиолокации, уравнение оптической локации.

V. I. Timofeev*

PhD, Tech., Associate Professor

A. S. Sliusarenko*

PhD, Tech., Associate Professor

E. A. Puzius*

PhD Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

METHOD FOR CALCULATING THE MAXIMUM RANGE OF AVIATION RADAR AND OPTICAL-LOCATION SYSTEMS IN A REAL ATMOSPHERE

The article discusses one of the engineering methods for estimating the range of radar and optical-location means of detecting and identifying ground and air objects (aircraft) in the presence of a limited number of input parameters in models of attenuation of electromagnetic radiation in the radio range and in the optical range in a real atmosphere, taking into account operational and technical characteristics of surveillance systems. The proposed method is based on an iterative approach and comparison of the ranges of these observation systems in real and ideal atmospheric conditions.

Keywords: electromagnetic radiation, ideal atmosphere, real atmosphere, meteorological visibility range, operating range of radar and optical-location systems, radar range equation, optical location equation.

В число важнейших технических характеристик средств обнаружения и опознавания наземных объектов и летательных аппаратов (ЛА) различных типов с использованием радиолокационных и оптико-локационных систем входят вероятность обнаружения объекта и дальность действия радиолокационных станций (РЛС), а также визирных систем различных типов (оптических, оптико-электронных, телевизионных).

Дальность действия радиолокационных и оптико-локационных систем зависит от следующих основных факторов:

– характеристики наземных и воздушных объектов (тип, отражательная способность, скорость перемещения, курсовой угол и т. д.);

– эксплуатационно-технические параметры аппаратуры наблюдения;

– условия среды распространения электромагнитных излучений (ЭМИ) в атмосфере.

Наиболее полной характеристикой вероятности дальности обнаружения объекта является интегральный закон распределения дальности обнаружения, построение которого связано с проведением достаточно трудоемких натур-

ных экспериментов и математического моделирования. Поэтому на практике вместо закона распределения дальности обнаружения объектов используют такие его параметры, как максимальная и минимальная дальности, средняя (эффективная) дальность и некоторые другие.

Под максимальной дальностью обнаружения объекта понимается наибольшее расстояние, на котором отношение принимаемого сигнала к среднеквадратичному напряжению шумов равно единице, а процесс обнаружения происходит при некоторых идеализированных условиях без учета влияния атмосферы.

Минимальная дальность действия аппаратуры характеризуется наименьшим расстоянием, на котором еще может обнаруживаться объект при заданном уровне помех.

Эффективная дальность является оценкой математического ожидания (среднего значения) дальности обнаружения в конкретных условиях применения средств наблюдения.

На уменьшение дальности обнаружения объектов существенное влияние оказывает ослабление ЭМИ в результате рассеяния и поглощения энергии волн молекулами атмосферных газов, твердыми аэрозольными частицами, каплями воды и ледяными кристаллами, из которых состоят атмосферные дымки, туманы, облака и осадки.

Для расчета ослабления электромагнитных волн в различных диапазонах излучений наиболее широко используется закон ослабления ЭМИ Бугера [1]. Интегральная форма закона Бугера для потока монохроматического излучения $\Phi(\lambda)$ имеет вид

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0(\lambda) \exp \left[- \int_0^L \beta(\lambda, l) dl \right], \quad (1)$$

где $\Phi(\lambda)$ и $\Phi_0(\lambda)$ – потоки монохроматического излучения, выходящего от источника излучения и излучения, падающего на приемное устройство, соответственно; $\beta(\lambda, l)$ – объемный коэффициент ослабления для пути l длиной в 1 км; L – длина трассы.

В соотношении (1) экспоненциальный коэффициент ослабления носит название коэффициента прозрачности атмосферы для монохроматического излучения:

$$\tau(\lambda) = \exp \left[- \int_0^L \beta(\lambda, l) dl \right]. \quad (2)$$

При практических расчетах обычно определяют среднее по трассе L значение коэффициента ослабления потока излучений $\Phi(\lambda)$:

$$\beta_{\lambda} = \exp(-\beta(\lambda)L). \quad (3)$$

С учетом соотношения (3), вместо выражения (1) можем записать:

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0(\lambda) \exp(-\beta(\lambda)L). \quad (4)$$

Помимо объемного коэффициента ослабления $\beta(\lambda)$, измеряемого в обратных км (км^{-1}), в радиотехнике используется децибельный коэффициент ослабления $\beta(\lambda) [\text{км}^{-1}] = 0,23 \Gamma(\lambda) [\text{дБ/км}^{-1}]$.

При расчете коэффициента ослабления атмосфера представляется в виде набора тонких сферических слоев, в пределах каждого из которых показатель ослабления атмосферы, так же как и показатели рассеяния (поглощения) и индикатриса рассеяния, считаются постоянными. В этом случае средний показатель ослабления атмосферы на трассе L определяется как средневзвешенная величина вида

$$\beta(\lambda) = \frac{L_1}{L} \beta_1(\lambda) + \frac{L_2}{L} \beta_2(\lambda) + \dots + \frac{L_i}{L} \beta_i(\lambda) + \dots + \frac{L_n}{L} \beta_n(\lambda), \quad (5)$$

где L_1, L_2, \dots, L_i – длина i -го участка трассы;

$\frac{L_1}{L}, \frac{L_2}{L}, \dots, \frac{L_n}{L}$ – весовой вклад i -го участка

трассы распространения ЭМИ; n – число квазиоднородных слоев атмосферы; β_i – показатели ослабления атмосферы на i -ом участке трассы.

Все методы расчета дальности действия систем обнаружения наземных и воздушных объектов являются приближенными, так как для точного решения задач переноса ЭМИ через слой атмосферы конечной толщины требуются подробные сведения о состоянии среды распространения электромагнитных волн в конкретных условиях применения средств наблюдения. Эти сведения могут быть получены только на этапе испытания новых систем обнаружения, но не в процессе их практического применения (технической эксплуатации).

В предлагаемом методе входными параметрами модели расчета максимальной дальности действия средств обнаружения объектов являются: длина волны источника излучения λ ; максимальная дальность действия аппаратуры в идеализированных условиях (без учета влияния атмосферы); спектральные коэффициенты ослабления на пути распространения ЭМИ. Наиболее полезными и простыми описаниями влияния различных факторов на работу РЛС

являются основные уравнения радиолокации и оптической локации [2, 3].

Одна из форм записи основного уравнения радиолокации позволяет определить мощность принятого сигнала без учета влияния атмосферы в виде следующего соотношения:

$$P_{np} = \frac{P_{изл}}{4\pi R_{дал}^2} \frac{S_{эф}}{4\pi R_{дал}^2} A, \quad (6)$$

где P_{np} – мощность принятого сигнала, Вт; $P_{изл}$ – мощность сигнала, излучаемого антенной РЛС, Вт; $S_{эф}$ – эффективная площадь рассеяния объекта, м²; G – коэффициент усиления антенны; A – эффективная площадь апертуры антенны, м²; $R_{дал}$ – расстояние между РЛС и объектом (наклонная дальность объекта), м.

Первый множитель в соотношении (6) представляет собой плотность потока мощности излучения (Вт·м⁻²) на сфере радиусом $R_{дал}$, если источник излучения с мощностью $P_{изл}$ помещен в центр сферы. Этот сомножитель учитывает распределение энергии ЭМИ в свободном пространстве для зондирующего сигнала.

Второй множитель характеризует относительную долю мощности излучения, которая отразилась от объекта с эффективной площадью рассеяния $S_{эф}$ и возвращается обратно к приемной антенне радиолокатора. Для простоты рассматриваем однопозиционную РЛС, у которой местоположение приемной и передающей антенн совпадает.

Третий множитель описывает часть мощности эхо-сигнала, которая улавливается приемной антенной и зависит от площади ее апертуры.

При распространении сигнала в атмосфере без учета влияния поверхности Земли его ослабление на трассе длиной $R_{дал}$ происходит дважды: сначала для мощности зондирующего сигнала, а затем для мощности отраженного эхо-сигнала. Применяя закон Бугера для обоих сигналов, вместо уравнения (6) можем записать следующее выражение:

$$P_{np} = \frac{P_{изл} G}{4\pi R_{дал}^2} \exp\left(-0,23 \int_0^{R_{дал}} \Gamma(\lambda, r) dr\right) \times \frac{S_{эф}}{4\pi R_{дал}^2} \exp\left(-0,23 \int_0^{R_{дал}} \Gamma(\lambda, r) dr\right) A, \quad (7)$$

где $\Gamma(\lambda, r)$ – коэффициент ослабления (затухания) мощности излучения для длины волны λ , Дб·км⁻¹.

В случае общей антенны для передачи и приема коэффициент усиления G и эффективная

площадь апертуры антенны A связаны соотношением:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2}, \quad (8)$$

откуда

$$A = \frac{G\lambda^2}{4\pi}, \quad (9)$$

где λ – длина волны, м.

Подставим (9) в уравнение (7) и получим:

$$P_{np} = \frac{P_{изл} G^2 \lambda^2 S_{эф}}{(4\pi)^3 R_{дал}^4} \exp\left(-0,46 \int_0^{R_{дал}} \Gamma(\lambda, r) dr\right). \quad (10)$$

Соотношение (10) является уравнением дальности радиолокации в атмосфере.

Максимальная дальность радиолокационного обнаружения объекта определяется как дальность, при которой мощность принятого отраженного сигнала P_{np} равна мощности минимально обнаруживаемого на фоне помех сигнала $P_{np\min}$. В связи с этим уравнение (10) можно преобразовать к следующему виду:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{изл} G^2 \lambda^2 S_{эф}}{(4\pi)^3 P_{n\min}} \exp\left(-0,46 \int_0^{R_{\max}} \Gamma(\lambda, r) dr\right), \quad (11)$$

где R_{\max}^4 – максимальная дальность действия РЛС в атмосфере.

Аналогичное уравнение для свободного пространства получается из соотношения (6) с учетом выражения (9):

$$R_{\max_0}^4 = \frac{P_{изл} G^2 \lambda^2 S_{эф}}{(4\pi)^3 P_{np\min}}, \quad (12)$$

где $R_{\max_0}^4$ – максимальная дальность действия

РЛС в свободном пространстве (приводится для разных высот ЛА в техническом описании).

Разделим соотношение (11) на соотношение (12) и после преобразования получим формулу для учета влияния атмосферы на максимальную дальность действия РЛС:

$$R_{\max} = R_{\max_0} \left[\exp\left(-0,46 \int_0^{R_{\max}} \Gamma(\lambda, r) dr\right) \right]^{1/4}, \quad (13)$$

или

$$R_{\max} = R_{\max_0} \exp\left(-0,115 \int_0^{R_{\max}} \Gamma(\lambda, r) dr\right). \quad (14)$$

Для решения уравнения (14) вся трасса разбивается на несколько однородных участков, в пределах которых коэффициент ослабления $\Gamma(\lambda, r)$ можно считать постоянным. Вес каждого участка C_i пропорционален его длине, т. е.

$$C_i = \frac{R_{\max_i}}{R_{\max}}, \quad (15)$$

где i – порядковый номер участка, на которые разбивается трасса.

С учетом (15) выражение для коэффициента ослабления имеет вид

$$\Gamma(\lambda) = \sum_{i=1}^n c_i \Gamma_i(\lambda), \quad (16)$$

где n – число участков, на которые разбивается трасса (наклонная дальность до объекта); $\Gamma_i(\lambda)$ – коэффициент ослабления радиоволн на i -м участке.

С учетом (16) соотношение (14) преобразуется к следующему виду:

$$R_{\max} = R_{\max_0} \exp(-0,115 \Gamma(\lambda) R_{\max}), \quad (17)$$

или

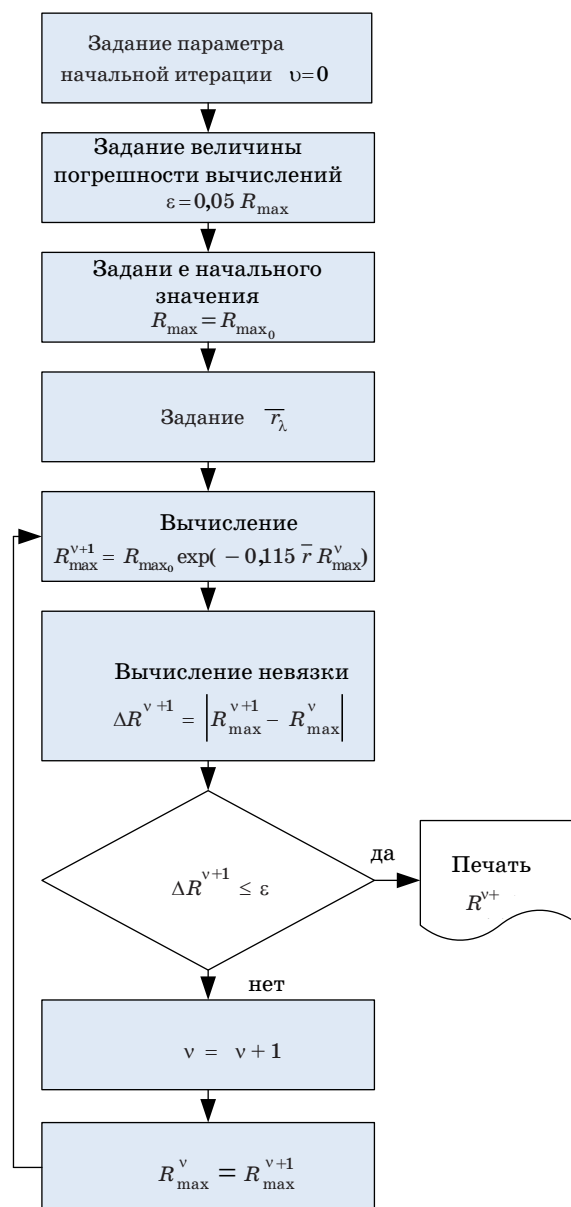
$$R_{\max} - R_{\max_0} \exp(-0,115 \Gamma(\lambda) R_{\max}) = 0. \quad (18)$$

Уравнение (18) является трансцендентным уравнением. Оно решается итерационными методами, среди которых чаще всего используются метод половинного деления, метод ложного положения, метод Ньютона, метод секущих. Целью каждого из этих методов является отыскание действительных корней уравнения (18). В данной задаче воспользуемся методом простой итерации, который приоритетен именно из-за своей простоты, хотя он и не всегда обеспечивает достаточно быструю сходимость. Структурно-функциональная схема алгоритма метода простой итерации приведена на рисунке.

В качестве подходящего начального значения $R_{\max}^{v=0}$ принимается паспортное значение R_{\max_0} для заданной высоты полета ЛА (v – номер итерации), а для оценки сходимости по абсолютной величине разности двух последовательных приближений R_{\max}^v и R_{\max}^{v+1} берут $\varepsilon = 0,05 R_{\max_0}$.

Требовать большей точности не имеет смысла вследствие значительной погрешности определения $\Gamma(\lambda)$, достигающей иногда 20–30%.

Значения коэффициентов ослабления радиоволн облаками, осадками и туманом Γ_λ можно взять в справочнике [3].



Структурно-функциональная схема алгоритма метода простой итерации для расчета дальности действия РЛС в атмосфере

Для получения уравнения максимальной дальности действия активных оптических систем наблюдения (лазерных дальномеров, оптических координаторов положения объекта) воспользуемся основным уравнением оптической локации.

Запишем уравнение максимальной дальности действия оптического квантового генератора без учета влияния атмосферы в следующем виде:

$$D_{\max_0} = \left[\frac{1}{\pi k_{\text{изл}} \Phi_{\min vi}} P_{\text{изл}} \zeta_{\text{ц}} S_{\text{вх}} \eta_{\text{удл}} \cos \chi \right]^{1/2}, \quad (19)$$

где $P_{\text{изл}}$ – мощность излучателя, Вт; $k_{\text{изл}}$ – коэффициент потерь в излучателе; $\zeta_{\text{ц}}$ – коэффициент диффузного отражения объекта; $S_{\text{вх}}$ – площадь входного зрачка объектива, м²; χ – угол между нормалью к отражающей поверхности и вектором дальности D_{\max_0} .

Уравнение для максимальной дальности действия оптического квантового генератора в реальной атмосфере при условии ослабления ЭМИ на трассе по закону Бугера будет иметь вид:

$$D_{\max} = \left[\frac{1}{\pi k_{\text{изл}} \Phi_{\min vi}} \times \times P_{\text{изл}} \zeta_{\text{ц}} S_{\text{вх}} \eta_{\text{удл}} \cos \chi \tau_{\text{изл}} \tau_{\text{отр}} \right]^{1/2}, \quad (20)$$

где $\tau_{\text{изл}}$ и $\tau_{\text{отр}}$ – коэффициенты прозрачности атмосферы соответственно на путях излученного и отраженного лазерного луча соответственно.

В соответствии с соотношением (3) можем записать:

$$\tau_{\text{изл}}(\lambda) = \exp(-\beta(\lambda) D_{\max \text{ изл}}), \quad (21)$$

$$\tau_{\text{отр}}(\lambda) = \exp(-\beta(\lambda) D_{\max \text{ отр}}), \quad (22)$$

где $D_{\max \text{ изл}}$ и $D_{\max \text{ отр}}$ – длина пути для излученного и отраженного лазерных лучей соответственно, км; $\beta(\lambda)$ – объемный коэффициент ослабления ЭМИ, км⁻¹.

Расстояние между излучателем и объектом $D_{\max \text{ изл}}$, а также объектом и приемником излучения $D_{\max \text{ отр}}$, как правило, различны. Но для упрощения решения задачи можно допустить, что оптико-квантовый излучатель и приемник излучений находятся в одной точке. С учетом сделанного допущения, разделив соотношение (20) на (19), получим следующее выражение для расчета максимальной дальности действия активной оптико-локационной системы в атмосфере:

$$D_{\max} = D_{\max_0} \left[\exp(-\beta(\lambda) D_{\max}) \right]. \quad (23)$$

Для определения коэффициента прозрачности атмосферы у поверхности земли при горизонтальном распространении ЭМИ (угловая ориентация линии визирования аппаратуры равна нулю) воспользуемся следующей эмпирической связью между средними значениями коэффициента ослабления $\beta(\lambda)$ и метеорологиче-

ской дальностью видимости $S_{\text{МДВ}}$ [4, 5] в виде соотношения:

$$\beta(\lambda) = \frac{3,91}{S_{\text{МВД}}} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-0,583 \sqrt{S_{\text{МВД}}}}, \quad (24)$$

где $S_{\text{МДВ}}$ – метеорологическая дальность видимости, км⁻¹; λ – длина волны, в микрометрах, мкм.

По определению [4], метеорологической дальностью видимости (МДВ) называется то наибольшее расстояние, на котором в светлое время суток можно различить (обнаружить) на фоне неба у горизонта или на фоне воздушной дымки абсолютно черный объект достаточно больших угловых размеров (более 15°). При применении фотометрического базисного способа измерения прозрачности атмосферы на метеорологических станциях часто используется термин метеорологическая оптическая дальность (МОД). В качестве основного оперативного параметра при метеорологическом обеспечении авиации принят именно этот более обоснованный параметр прозрачности атмосферы, хотя чаще всего в оптике атмосферы оба параметра дальности видимости считаются равнозначными. Это требует дополнительных уточнений.

Подставив (24) в формулу (23), получим модель атмосферного оптического канала для расчета максимальной дальности действия активных оптико-локационных станций в безоблачной атмосфере. Эта модель имеет вид

$$D_{\max} = D_{\max_0} \times \left\{ \exp \left[-\frac{3,91}{S_{\text{МВД}}} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-0,583 \sqrt{S_{\text{МВД}}}} D_{\max} \right] \right\}. \quad (25)$$

При наклонных трассах распространения оптических сигналов используют различные модели распределения с высотой оптических характеристик аэрозольной атмосферы. Чаще всего зависимость оптической толщины τ от высоты z принимается экспоненциальной, представленной в виде соотношения [6]:

$$\tau(z) = \tau_0 \{ 1 - \exp[-\beta(0)z / \tau_0] \}, \quad (26)$$

где τ_0 – оптическая толщина атмосферы у поверхности земли, рассчитываемая с использованием соотношений (3) и (24) для различных значений МДВ.

Решение уравнения (25) также осуществляется рассмотренным выше методом итераций.

Библиографический список

1. *Мак-Картни*. Оптика атмосферы / пер. с англ. под ред. К. С. Шифрина. М.: Мир, 1979. 424 с.
2. Сигналы и помехи в лазерной локации /под ред. В. Е. Зуева. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
3. Справочник по радиолокации / под ред. М. Сколника. Т. 1: Основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1976. 456 с.
4. Авиационные системы информации оптического диапазона: справочник / под ред. Л. З. Криксунова. М.: Машиностроение, 1985. 264 с.
5. *Криксунов Л. З., Усольцев Н. Ф.* Инфракрасные системы. М.: Сов. радио, 1968. 320 с.
6. *Зуев В. Е., Кабанов М. В.* Перенос оптических сигналов в земной атмосфере. М.: Сов. радио, 1971. 368 с.

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.7

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-261-264

К. И. Алексеева*

магистрант

В. Л. Оленев*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЗАДЕРЖЕК
ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ ДАННЫХ В БОРТОВЫХ СЕТЯХ SPACEWIRE**

Приведено уточнение формулы расчета максимальной задержки передачи пакета данных в сети SpaceWire в виде аналитической модели. Эта аналитическая модель зависит от длины буфера входного порта коммутатора. Рассмотрены и приведены расчеты двух ситуаций, когда длина входного пакета не превышает длину входного буфера порта коммутатора, и когда длина пакета превышает длину входного буфера порта коммутатора.

Ключевые слова: SpaceWire, задержки, пакеты данных.

K. I. Alekseeva*

Postgraduate Student

V. L. Olenev*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

**METHODS FOR CALCULATING DELAYS OF TRANSFER
OF VARIOUS DATA CLASSES IN SPACEWIRE ON-BOARD NETWORKS**

This article clarified the formula for calculating the maximum delay of data packet transmission in the SpaceWire network in the form of an analytical model. This analytical model depends on the buffer length of the switch input port. Were considered and presented calculations of two situations when the length of the input packet does not exceed the length of the input buffer of the switch port, and when the length of the packet exceeds the length of the input buffer of the switch port.

Keywords: SpaceWire, delays, information packets.

На сегодняшний день протокол передачи данных SpaceWire [1] является одной из самых распространенных технологий, используемых в бортовых сетях космических аппаратов. Технология SpaceWire [2] – это международный стандарт коммуникаций бортового авиационного и космического оборудования, призванный заменить существующие интерфейсы (такие, как MIL-STD-1553B, ARINC, AFDX, CAN), не отвечающие современным требованиям по скорости передачи данных [1]. Одной из важных задач, необходимых для корректной и предсказуемой работы сети SpaceWire, является вычисление задержек передачи данных и управляющих кодов [3, 4].

Передача данных в сетях SpaceWire

Сетевые узлы работают с передаваемыми пакетами следующим образом [5]: приняв пер-

вый байт пакета (заголовок), узел принимает решение о маршрутизации принятого пакета на определенный выходной порт узла, после чего остальные байты поступающего пакета «на лету» коммутируются в выходной порт без буферизации пакета целиком в память коммутатора [6].

Таким образом, при длине пакета в n байт минимальное время доставки пакета, T_{\min} можно оценить как

$$T_{\min} = \frac{n * 10 + 4}{F} + \sum_{i=1}^S th_i, \quad (1)$$

где F – минимальная скорость передачи по каналам, бит/с; th – время обработки байта заголовка пакета в i -м маршрутизирующем коммутаторе; S – число сетевых узлов (маршрутизирующих коммутаторов), через которые проходит путь от узла-источника до узла-приемника.

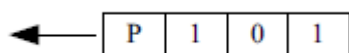


Рис. 1. Управляющий символ EOP в стандарте SpaceWire

Числитель дроби в формуле (1) выглядит следующим образом $n * 10 + 4$ из-за способа кодирования данных в стандарте SpaceWire. Битовый поток состоит из символов данных и управления. Тип символа определяется в зависимости от значения флага данные/управление. Символ данных включает в себя бит контроля по четности, флаг данные/управление и восемь бит данных. Значение флага данные/управление равное «0», указывает на то, что данный символ – символ данных [7].

Таким образом, один байт данных в сетях SpaceWire будет равен 10 битам. Однако пакет обязательно включает в себя еще один символ управления: EOP (End Of Packet), который сигнализирует о конце пакета. Управляющий символ EOP представлен на рис. 1.

Символ EOP в стандарте SpaceWire равен 4 битам, отсюда и получается, что общая длина пакета составит $n * 10 + 4$ бит.

Notation	Description
F	Минимальная скорость передачи по каналам, бит/с
th	Время обработки байта заголовка пакета в i -м маршрутизирующем коммутаторе
S	Число сетевых узлов (маршрутизирующих коммутаторов), через которые проходит путь от узла-источника до узла-приемника
Tmin	Минимальное время доставки пакета
m	Число входных портов, от которых идут пути через тот же выходной порт коммутатора

Максимальное время доставки пакета T_{\max} можно вычислить как сумму минимального времени доставки пакета T_{\min} и максимального времени ожидания во всех коммутаторах [1], эта формула была представлена в статье [6] А. С. Евдокимова и К. Н. Рождественской:

$$T_{\max} = T_{\min} + \sum_{j=1}^S (\sum_{i=1}^{m-1} (\frac{n * 10 + 4}{F} + th_i)). \quad (2)$$

Модифицированная аналитическая модель расчета передачи пакетов данных в сетях SpaceWire

Чтобы аналитическая модель была приближена к реальному коммутатору, будем учитывать и другие физические параметры кроме тех, которые учитывались ранее в формуле (2), например, есть реализации коммутаторов SpaceWire с входными и выходными буферами, поэтому будем учитывать длину буфера порта.

В SpaceWire нет буферизации пакета, но возникают ситуации [8], когда во входной порт пришел пакет, но в то же время, выходной порт, в который должен отправиться этот пакет, в данный момент времени занят (пример показан на рис. 2, где Input buf 1 означает входной буфер порта 1, а Output buf – выходной буфер порта). Пакет, выделенный зеленым цветом во втором входном порту, ожидает пока передается пакет, выделенный фиолетовым цветом в первом порту). В таком случае пакет во входном порту ожидает до тех пор, пока либо не освободится выходной порт, в который он может отправиться дальше, либо пока арбитр сам не отправит этот пакет. Также возможна ситуация, когда входной буфер будет занят и тогда следующему пакету придется ожидать в предыдущем маршрутизаторе, что также следует учесть.

В нашей модели будет учитываться только входной буфер, потому что с портом могут произойти физические проблемы и как результат – отказ порта, в то время как пакеты продолжают

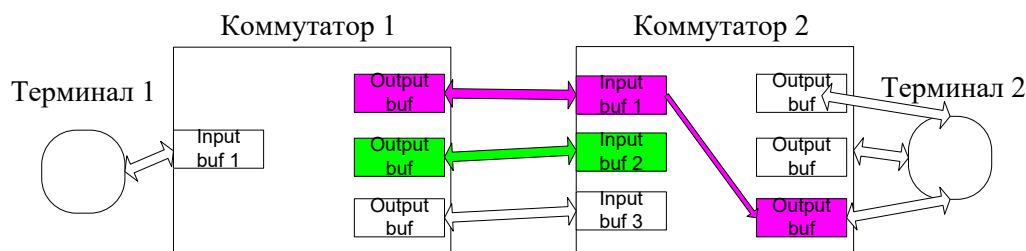


Рис. 2. Пример сети SpaceWire

ожидать в выходном буфере, но никуда не будут отправляться.

Как правило, буферы на всех портах в одном коммутаторе имеют одинаковую длину. Но не следует забывать, что в сети могут быть использованы коммутаторы от нескольких производителей, или от одного производителя, но имеющие разные серии. Таким образом, в одной сети могут быть разные как коммутаторы, так и их размеры буферов, следовательно, в формуле и это тоже стоит учесть.

Введем параметр t_L , которое будет означать время ожидания заголовка перед его обработкой. Это время будет зависеть не только от длины входного буфера порта коммутатора, через который прошел пакет, но и от самого размера заголовка пакета, поскольку важно получить заголовок пакета полностью, чтобы его обработать и передать на выходной порт.

Рассмотрим следующие ситуации:

1) когда длина заголовка пакета не превышает длины входного буфера, и в тоже время, когда заголовок вынужден ожидать освобождения выходного порта, в который ему нужно отправиться в соответствии с таблицей маршрутизации либо арбитром;

2) когда длина заголовка пакета превышает длину входного буфера, либо, когда входной буфер занят предыдущим пакетом, который еще не успел передаться до конца. В таком случае заголовок пакета (или часть пакета) будет ожидать также и в выходном порту предыдущего коммутатора (либо терминала). Следует учесть и это время ожидания.

Будем считать, что входные буферы одного коммутатора будут одинакового размера, поэтому введем параметр L_j , который будет обозначать длину входного буфера в каждом коммутаторе.

Необходимо учесть также время задержки в предыдущем порту, когда размер входного порта текущего коммутатора не может вместить в себя пришедший пакет, обозначим это время как t_{wtps} (waiting time in the previous switch).

Если учитывать сказанное выше, то получим аналитическую модель:

$$T_{\max} = T_{\min} + \sum_{j=1}^S \left(\sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{n \cdot 10 + 4}{F} + th_i + t_L \right) \right) \quad (3)$$

Пример вычисления по модифицированной аналитической модели максимальной задержки

Входные параметры:

Сеть SpaceWire, представленная на рис. 1.

Характеристики каналов передачи:

– скорости передачи в каналах одинаковые и $F=400$ Мбит/с.

Характеристики коммутаторов:

– время обработки заголовка пакета в каждом маршрутизирующем коммутаторе $th=200$ нс.

Рассмотрим первую ситуацию, когда длина пакета не превышает L длину входного буфера. Пусть длина пакета будет равна 64 байта.

Вычислим минимальную задержку по формуле 1 для передачи пакета, выделенного зеленым цветом:

$$T_{\min \text{ green}} = (64 \text{ байта} / 400 \text{ Мбит/с}) + 2 \cdot 200 \text{ нс} = 1,62 \text{ мкс}.$$

Вычислим максимальную задержку по формуле (2) для передачи пакета, выделенного зеленым цветом:

$$T_{\max \text{ green}} = 1,62 \text{ мкс} + 1,62 \text{ мкс} + 1,22 \text{ мкс} + 1,22 \text{ мкс} = 4,06 \text{ мкс}.$$

Поскольку пакет не превышает L , то не учитываем время ожидания t_{wtps} , а учитываем только время ожидания передачи предыдущего пакета, пусть $t_L = 30$ нс.

Вычислим максимальную задержку по формуле (3) для передачи пакета, выделенного зеленым цветом:

$$T_{\max \text{ green}} = 1,62 \text{ мкс} + \sum_{j=1}^2 \left(\sum_{i=1}^{2-1} \left(\frac{64 \text{ байта}}{400 \text{ Мбит/с}} + 200 \text{ нс} \right) \right) = 1,62 \text{ мкс} + 1,22 \text{ мкс} + 1,22 \text{ мкс} = 4,06 \text{ мкс}$$

Поскольку пакет не превышает L , то не учитываем время ожидания t_{wtps} , а учитываем только время ожидания передачи предыдущего пакета, пусть $t_L = 30$ нс.

Вычислим максимальную задержку по формуле (3) для передачи пакета, выделенного зеленым цветом:

$$T_{\text{new max green}} = 1,62 \text{ мкс} + \sum_{j=1}^2 \left(\sum_{i=1}^{2-1} \left(\frac{64 \text{ байта}}{400 \text{ Мбит/с}} + 200 \text{ нс} + 30 \text{ нс} \right) \right) = 1,62 \text{ мкс} + 1,25 \text{ мкс} + 1,25 \text{ мкс} = 4,12 \text{ мкс}$$

Можно заметить, что в первой ситуации максимальная задержка передачи пакета данных по формуле (3) в сравнении с максимальной задержкой по формуле (2) увеличилась на 0.06 мкс.

Рассмотрим вторую ситуацию, когда длина пакета превышает L . Будем учитывать время ожидания $t_{wtps} = 100$ нс, также учитываем вре-

мя ожидания передачи предыдущего пакета, тогда $t_L = 130$ нс.

$$T_{\text{new max green}} = 1,62 \text{ мкс} + \\ + \sum_{j=1}^2 \left(\sum_{i=1}^{2-1} \left(\frac{646 \text{ байта}}{400 \text{ Мбит/с}} + 200 \text{ нс} + 130 \text{ нс} \right) \right) = \\ = 1,62 \text{ мкс} + 1,35 \text{ мкс} + 1,35 \text{ мкс} = 4,32 \text{ мкс}$$

Можно заметить, что во второй ситуации максимальная задержка передачи пакета данных по формуле (3) в сравнении с максимальной задержкой по формуле (2) увеличилась на 0,26 мкс. Из этих данных можно сделать вывод, что верхнее значение максимальной задержки передачи пакетов данных увеличилось и связано это с использованием параметра времени ожидания заголовка перед его обработкой.

Заключение

В данной статье было приведено уточнение формулы (2) верхней границы задержек передачи данных в сетях SpaceWire в виде аналитической модели (3), которая теперь учитывает такие параметры как длина порта входного буфера коммутатора, а также время ожидания заголовка перед его обработкой либо в том же коммутаторе во входном порту, либо в предыдущем коммутаторе в выходном порту. Были рассмотрены и приведены расчёты двух ситуаций, когда длина входного пакета не превышает длину входного буфера порта коммутатора, и когда длина пакета превышает длину входного буфера порта коммутатора. В дальнейшем планируется уточнить формулы вычисления времени ожидания передачи предыдущего пакета данных и время задержки в предыдущем порту, когда размер

входного порта текущего коммутатора не может вместить в себя пришедший пакет.

Библиографический список

1. ESA. Standard ECSS-E-ST-50-52C, SpaceWire – Remote memory access protocol. Noordwijk: Publications Division ESTEC. 2010. 5 February.
2. Parkes S. et al. SpaceWire and SpaceFibre on the Microsemi RTG4 FPGA // IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2016. P. 1–8.
3. Olenov V., Karandashev A., Alexeeva K. Tools for Analysis and Tracking of Deadlock-Free Routes in On-Board SpaceWire Networks // Conference of Open Innovations Association, FRUCT – FRUCT Oy. 2020. № 26. P. 628–634.
4. Alexeeva K. I., Kurbanov L. I., Suvorova E. A. Calculation of Control Codes Delays in Onboard SpaceWire Networks // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). IEEE, 2019. P. 1–8.
5. Mason A., Parkes S. Using SpaceWire with LabVIEW // International SpaceWire Conference (SpaceWire). IEEE, 2014. P. 1–4.
6. Евдокимов А. С., Рождественская К. Н. Верхняя граница задержек передачи данных в сетях SpaceWire // Международ. студ. науч. конф.: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2018.
7. Koblyakova L. V., Gorbachev S. V. Tasks Of Hard Real Time Signals In Built-In Systems And Onboard Networks. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/dwnldReferences?arnumber=8840642> (дата обращения: 18.12.2020).
8. Kurbanov L., Rozhdestvenskaya K., Suvorova E. Deadlock-Free Routing in SpaceWire Onboard Network // 22nd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2018. P. 107–114.

УДК 004.7

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-265-267

А. В. Богданова*

магистрант

А. Ю. Сыщиков*

старший преподаватель

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ЗАДАЧИ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Представлен обзор задач по производственному планированию, которые решаются для увеличения производительности и работоспособности предприятия. Приведено описание реализованных программных продуктов для производственного планирования. Рассмотрены основные недостатки существующих систем.

Ключевые слова: планирование, предприятие, интегрированная система, программный продукт.

A. V. Bogdanova*

Postgraduate Student

A. Y. Syshchikov*

Senior Lecturer

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

TASKS AND EXISTING SOLUTIONS FOR PLANNING PRODUCTION PROCESSES IN VARIOUS FIELDS OF ACTIVITY

This article provides an overview of production planning tasks that are solving to increase the productivity and performance of the company. A description of software products for production planning that are currently on market is provided. The main disadvantages of the existing systems are considered.

Keywords: planning, enterprise, integrated system, software product.

Введение

Современные предприятия в различных областях деятельности представляют собой сложные технические, технико-экономические и технологические производственные комплексы, на которых работают тысячи человек. Данные комплексы нуждаются в построении математических моделей планирования и управления производством.

Результатом использования математических моделей планирования становится решение следующих проблем развития предприятия: расчет оценок эффективности технологий и договоров, рентабельности продукции, точная калькуляция пределов, планирование и прогнозирование развития производственных процессов, выявление узких мест на производстве [1].

Классификация задач планирования и управления предприятием

Состав и содержание рассматриваемых задач во многом определяются уровнем планирования.

1. Перспективное планирование. Среди задач данного класса можно выделить следующие:

- определение целей и стратегий развития предприятия;
- выработка бюджетно-финансовой стратегии предприятия;
- оптимизация темпов и пропорций развития отдельных производств;
- определение размеров и оптимальное распределение капиталовложений и инвестиций;
- обеспечение максимально возможной экологической безопасности производства;
- управление персоналом, включая повышение квалификации, подбор и расстановку управленческих кадров, формирование кадрового резерва.

2. Технико-экономическое планирование. В числе основных функций следует отметить определение оптимальных объемов выпуска продукции заданной номенклатуры на длительный срок, с учетом обеспеченности плана всеми видами производственных ресурсов, определение потребности во внешних ресурсах.

В данном типе планирования можно выделить задачи такого характера:

- составление технико-экономической программы на определенный период;
- составление бюджета предприятия и выбор финансовой стратегии;
- определение ценовой политики предприятия;
- распределение функций и формирование долгосрочных планов подразделений;
- составление графика решения производственных задач, связанных с капиталовложением;
- расчет необходимых производственных ресурсов и их источников.

3. Оперативное планирование. Основной функцией является формирование оптимальных планов производства продукции за краткосрочный период. К такому планированию относятся:

- планирование производства и сбыта продукции;
- управление запасами сырья, химикатов, энергоносителей и продукции предприятия;
- расчет требуемых производственных ресурсов, определение их источников.

Необходимые критерии для создания интегрированной системы управления предприятием

Повышение эффективности планирования и управления производством, качества выпускаемой продукции и принимаемых решений становится реальным при создании единой интегрированной системы управления предприятием. Обязательные свойства ИСУП:

- наличие единой информационно-вычислительной сети предприятия с возможностью расширения при увеличении объемов информации или количества подключаемых рабочих станций;
- единая база данных предприятия, допускающая гибкое расширение, решение вопросов надежности и секретности;
- единая система управления базами данных;
- тщательно спроектированные рабочие места с возможностью решения задач учета и контроля, а также анализа, планирования и прогнозирования;
- оперативная «бесбумажная» обработка, передача документов и сообщений между управленческим персоналом (системы обработки документов, электронная почта и др.), наличие единых правил документооборота на предприятии.

Реализованные решения

На данный момент существует множество реализованных решений. Ниже представлены три самых ярких из них.

1. GanttPRO – это сервис для планирования и управления проектами с помощью диаграммы Ганта.

Данное решение обладает рядом возможностей:

- создание наглядных планов проектов;
- назначение участников на задачи;
- контроль выполнения задач;
- отслеживание развития проекта;
- управление ресурсами;
- поддержка Drag-and-drop;
- поиск и фильтры;
- экспорт диаграмм в PDF, PNG, XLSX или XML;
- возможность поделиться проектом;
- критический путь;
- шаблоны проектов для различных сфер;
- комментарии к задачам и прикрепление файлов;
- просмотр истории изменений и отмена действий;
- доска задач;
- базовый план [2].

2. OptiMES – это программа для управления и планирования производства. Данная программа реализует удобный и графический интерфейс, работу с различным типом продукции. OptiMES включает в себя десятки переменных и параметров: сроки, люди, бригады, изменения конфигурации, сырье, переоборудование, доступность инструмента, производительность труда, технологии, нормы, праздники и т. д. Кроме того, он позволяет включать автоматическое планирование и перепланирование из корзины заказов или получать данные непосредственно из системы учета. Анализирует узкие места производства [3].

3. Siemens MOM Software – комплекс решения от Siemens, для задач управления производственными операциями. Разные MOM-системы разработаны для дигитализации производственных процессов и последующего объединения в одну систему, включающую в себя:

- сбалансированный производственный план и календарное планирование;
- управление объектами, соответствием, качеством, исследованиями и разработками;
- интерфейс «человек – машина»;
- системы управления производственными процессами;
- производственная аналитика;

- анализ производительности;
- интеллектуальные системы SCADA;
- последовательность действий [4].

Недостатки данных решений

Несмотря на перечисленные возможности данных продуктов отметим их недостатки, которые не позволяют применить данные решения на конкретном предприятии:

- отсутствие возможности совмещения с реализованным программным продуктом, действующим на предприятии;
- отсутствие возможности быстрой технической настройки;
- несовместимость с рабочей базой данных;
- необходимость в обучении новому продукту.

Заключение

В этой статье были рассмотрены различные задачи и методы их решения в производственном планировании. Выявлены яркие недостатки решений, которые ограничивают способность внедрения данных продуктов в работу конкретного предприятия. Для разработчика системы планирования производством необходимо учитывать способность гибкой доработ-

ки продукта, наличие постоянной технической поддержки, совместимость с рабочей базой.

В результате был сделан вывод, что для реализации системы планирования производством необходимо изучение потребностей и возможностей данного производства, систематический сбор данных, тщательный анализ полученных данных, простой и удобный для пользователя интерфейс.

Библиографический список

1. Воронин А. В., Кузнецов В. А. Математические модели и методы в планировании и управлении предприятием ЦБП. Петрозаводск: Изд-во Петрозавод. гос. ун-та, 2000. С. 260.
2. Онлайн-диаграмма Ганта для планирования и управления проектами. URL: <https://startpack.ru/application/ganttpro-chart> (дата обращения: 04.12.2020).
3. Система APS для планирования производства. URL: <https://optimes.syneo.pl/ru/funkcje/production-and-order-planning-aps> (дата обращения: 05.12.2020).
4. Решения по управлению производством (MOM). URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/our-story/glossary/manufacturing-operations-management-mom/13153> (дата обращения: 05.12.2020).

УДК 004.728

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-268-271

А. Ю. Виноградов*

инженер

Е. А. Суворова*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРОБЛЕМЫ ОБМЕНА ДАННЫМИ В МУЛЬТИПРОТОКОЛЬНЫХ СЕТЯХ ETHERNET-SPACEWIRE И ETHERNET-SPACEFIBRE И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Представлен обзор протокола Eth-SpW, его модификаций и внутренней структуры новой версии моста.

Ключевые слова: протоколы канального уровня, SpaceWire, SpaceFibre, Ethernet.

A. U. Vinogradov*

Engineer

E. A. Suvorova*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

PROBLEMS OF DATA EXCHANGE IN MULTIPROTOCOL ETHERNET- SPACEWIRE AND ETHERNET-SPACEFIBRE NETWORKS AND WAYS TO SOLVE THEM

This article provides an overview of the Eth-SpW Protocol, its modifications, and the internal structure of the new bridge version.

Keywords: link layer protocols, SpaceWire, SpaceFibre, Ethernet.

На сетевые устройства возложена важная задача: быстро, без потерь и с малыми задержками передавать данные от одного устройства к другому, но не все устройства используют один и тот же протокол для передачи данных. Для согласования протоколов SpaceWire и Ethernet был разработан мост Eth-SpW [1]. Там использовался одноименный протокол, который работал на канальном уровне. В результате получилось простое и функциональное устройство с таким же простым протоколом. Однако выяснилось, что разработка программного обеспечения для компьютеров, к которым осуществляется подключение по Eth, связано с определенными сложностями. Трудно достигнуть пропускной способности, обеспечиваемой на уровне аппаратного канала, возникли также проблемы с переносимостью на разные операционные системы.

К тому же сам протокол имеет существенное функциональное ограничение – в один момент времени может обслуживать только один порт SpW. В мосту, как правило, реализуется большее количество каналов SpW. Это связано с тем, что зачастую требуется, чтобы мост обеспечивал

несколько точек подключения к сети SpW, кроме того, пропускная способность одного канала SpW несколько ниже Eth. При использовании существующего протокола второй канал простаивал [2]. В 2019 г. на смену стандарта SpW вышел новый стандарт SpFi [3]. В соответствии с этим возникла необходимость разработки мостов Eth-SpFi. Вследствие этого началась разработка и исследование следующей версии протокола Eth-SpFi, ориентированного на поддержку как нового стандарта SpFi, так и ранее поддерживаемого SpW/, который мог бы использоваться как в новой версии моста, так и в старой, и передавать данные SpaceFibre[3] по трем (и более) виртуальным каналам сразу, а в старой версии моста – SpaceWire[4] по двум портам одновременно. Всего можно было обслуживать одновременно четыре канала данных, а также служебные данные. На рис. 1 показана структура данных, передаваемая в фреймах Ethernet по новой версии протокола Eth-SpFi [5].

В первом байте заголовка содержатся два поля, в которых указаны используемые виртуальные каналы и какие виртуальные каналы завершаются в текущем сегменте данных.

Header	Length	Data Virtual Cannels	EOPs
--------	--------	----------------------	------

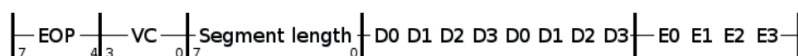


Рис. 1. Структура фрейма данных

В следующем байте указан размер данных на один виртуальный канал. Дальше идут чередующиеся данные с виртуальных каналов в порядке от 0 до 3. Неиспользуемый канал пропускается. В поле EOPs могут быть символы ненормального окончания пакета EEP (0x01) или нормального окончания пакета EOP(0x00). Получившаяся версия протокола позволяет с большей эффективностью параллельно передавать мелкие фрагменты данных. На графике показано сравнение старой и новой версии протокола по использованию служебной информации.

На рис. 2 видно, что протокол теряет свою эффективность при передаче больших пакетов, но никто не мешает переключаться на первую версию протокола, если не требуется несколько каналов. Более подробное сравнение протоколов описано в статье «Upgrade of Ethernet-SpaceWire Protocol» на 24-й конференции FRUCT [5].

В новой версии протокола осталась все та же проблема – поддержка разных ОС. Поэтому следующим шагом было – использование протокола UDP [6]. Тут сразу решается проблема с разными ОС, потому как данный протокол поддерживается сразу из «коробки». Потребуется только разбирать сами данные, передаваемые в этом протоколе. Еще одним из достоинств протокола UDP является то, что он просто реализует-

ся в ПЛИС, и в отличие от протокола этого же уровня – TCP, он имеет малую задержку, а контроль целостности передаваемых данных остается за протоколом Eth-SpW и его модифицированной версией, которые будут подняты на уровень UDP.

Протокол UDP расположен на транспортном уровне модели OSI и требует реализацию сетевого и канального уровня, на которых работают такие протоколы как IP и ARP. Благодаря использованию IP адреса вместо mac адреса, появляется возможность размещать мост и ПК пользователя далеко друг от друга. А поддержка протокола DHCP позволит использовать мост как устройства с поддержкой технологии «Plug and play».

Новая версия моста была реализована на ПЛИС Kintex от компании Xilinx. В моем распоряжении были высокоскоростные приемопередатчики (GTX), настроенные на скорость 1250 мбит/с, реализация протокола SpFi, написанная на языке VHDL, для ASIC и была адаптирована под FPGA. Со стороны Ethernet, рядом с ПЛИС, установлена микросхема Micrel, обеспечивающая физический уровень. На рис. 3 показана примерная структура моста, в которой отмечены некоторые блоки и направления передачи данных.

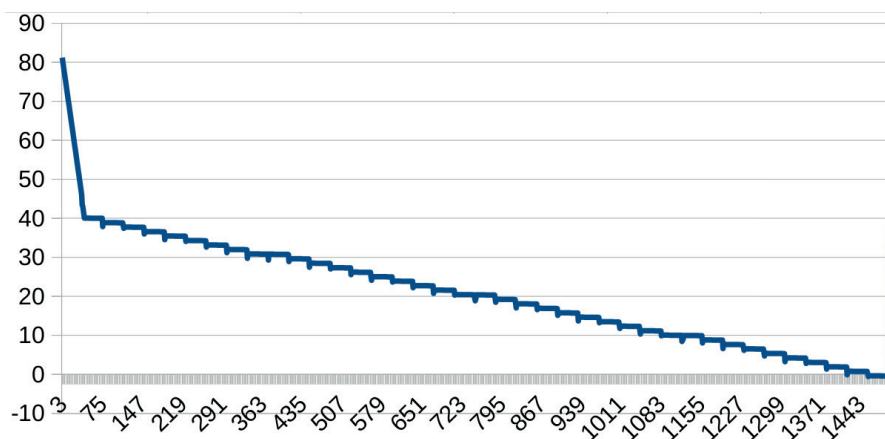


Рис. 2. Сравнение версий протокола по количеству используемой служебной информации

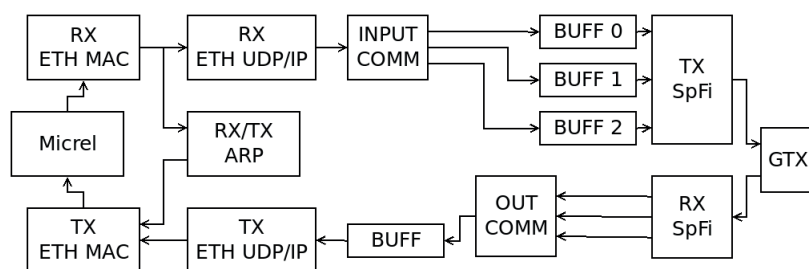


Рис. 3. Внутренняя структура новой версии моста

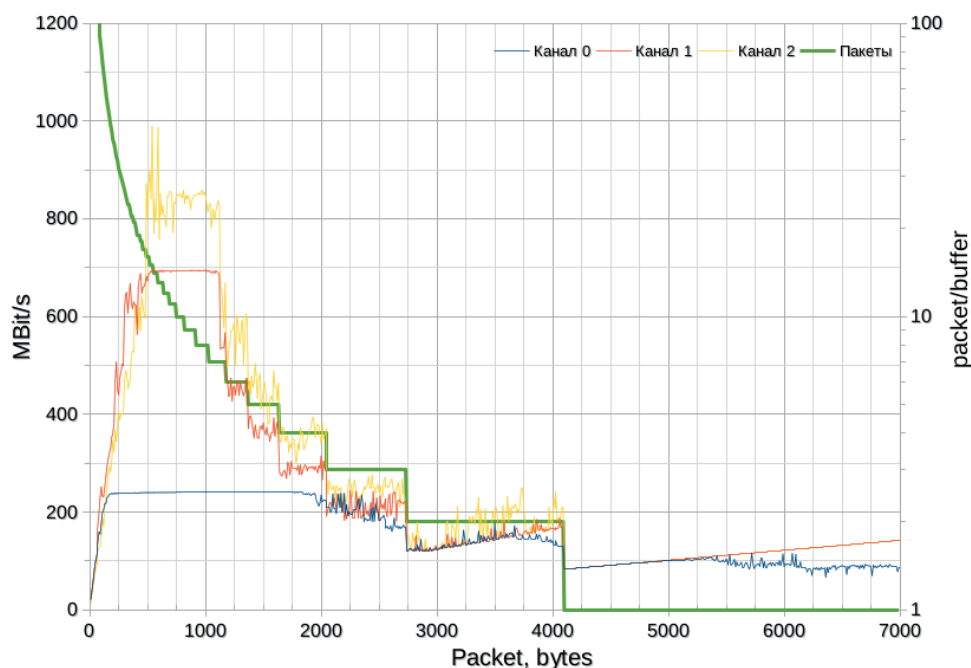


Рис. 4. Экспериментальное исследование пропускной способности

Рассмотрим каждый из блоков.

1. «RX ETH MAC» и «TX ETH MAC» работают на канальном уровне модели OSI, «отрезают» и добавляют от Ethernet фрейма Ethernet заголовок и контрольную сумму.

2. «RX ETH UDP/IP» и «TX ETH UDP/IP» работают на сетевом и транспортном уровне. Отвечают за работу с IP и UDP.

3. «INPUT COMM» в соответствии с номером порта UDP перенаправляет данные на соответствующий каждому каналу буфер.

4 «BUFF *» – буферы.

5. «TX/RX SpFi» – прием и передача пакетов SpFi.

6. «GTX» – высокоскоростной приемопередатчик.

7. «OUTPUT COMM» – блок, выбирающий с какого канала забирать данные.

8 «RT/TX ARP» – определение IP адреса по мас.

Одновременно с мостом разрабатывалось специальное ПО на языке программирования Си, которое позволяет передавать и принимать данные от моста и контролировать степень заполненности его буферов.

Для тестирования был собран экспериментальный макет, состоящий из моста Eth-SpFi и компьютера с гигабитной сетевой картой Ethernet. Затем ПО посылало фреймы определенного размера и измеряло скорость передачи. Кроме экспериментальных данных, на рис. 4 показан график с расчетным количеством пакетов в буфере.

На рис. 4 видно, что наибольшая скорость передачи данных получается при размере фрейма от 400 до 1100 байт, и в этот момент в буфере канала находится не меньше 7 пакетов. Далее по графику видно, что с каждым уменьшением количества пакетов в буфере – падает скорость передачи данных.

Подводя итог данного обзора можно сказать, что новая версия протокола с UDP может существенно упростить разработку ПО под разные операционные системы, добавляет воз-

можность автоматического конфигурирования сети и не ограничивает местонахождение моста и ПК пользователя в пределах одного коммутатора.

Библиографический список

1. *Yablokov E., Rozanov V., Vinogradov A.* Protocol for Connection Ethernet Interface to SpaceWire Networks // Proceedings of the 17th Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2015.

2. *Виноградов А. Ю., Яблоков Е. Н.* Практическое использование протокола EthernetSpaceWire // Научная сессия ГУАП: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2017.

3. SpaceFibre (ECSS-E-ST-50-11C) / S. Parkes, A. Ferrer, A. Gonzalez, C. McClements. 2019. 233 p.

4. ECSS Standard ECSS-E-ST-50-12C // SpaceWire, Links, Nodes, Routers and Networks. European Cooperation for Space Data Standardization, 2008. Is. 1.

5. *Vinogradov A., Yablokov E., Yachnaya V.* Upgrade of Ethernet-SpaceWire // Protocol of the 24th Conference of Open Innovations Association FRUCT. 2019.

6. RFC 768 // J. Postel. ISI. 1980. 28 August.

УДК 378.147

В. Н. Иванов*

кандидат технических наук, доцент

Д. В. Иванов*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ АРХИТЕКТУРЫ РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО

Рассмотрены основные вопросы, касающиеся реализации программной архитектуры RRS (Reconfigurable Radio System), а также интерфейса MURI (Multiradio Interface) как ключевого элемента нового гармонизированного стандарта реконфигурируемых радиосистем.

Ключевые слова: мультирадиоинтерфейс, реконфигурируемые радиосистемы, радиовиртуальные машины, унифицированные радиоприложения.

V. N. Ivanov*

PhD, Tech., Associate Professor

D. V. Ivanov*

Postgraduate Student

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

IMPLEMENTATION OF THE RECONFIGURABLE RADIO SOFTWARE ARCHITECTURE

The main issues related to the implementation of the RRS (Reconfigurable Radio System) software architecture, as well as the MURI (Multiradio Interface) interface, as a key element of the new harmonized standard for reconfigurable radio systems, are considered.

Keywords: MURI, RRS, RVM (Radio Virtual Machine), URA (Unified Radio Application).

Описание архитектуры RRS

Реконфигурируемая радиосистема является реализацией концепции, в которой имеется возможность изменять параметры радиоаппаратуры программным способом. Архитектура RRS обладает рядом положительных особенностей, делающих ее программную разработку более удобной:

- возможность загрузки программного обеспечения сторонних производителей;
- высокий уровень безопасности системы;
- гибкость программного кода – целые блоки программы могут с легкостью быть заменены на другие. Данное свойство позволяет успешно добавлять новые алгоритмы, а также проводить модернизацию и исправление ошибок в уже существующих;
- радиоприложения имеют возможность запускаться на радиоаппаратуре параллельно.

На рис. 1 приведено схематичное изображение архитектуры RRS.

Архитектура RRS состоит из следующих частей: CLS (Communication Services Layer), RCF

(Radio Control Framework), URA (Unified Radio Application) и Radio Platform, а также интерфейсы RRFI (Reconfigurable Radio Frequency Interface), URAI (Unified Radio Application Interface) и MURI.

Интерфейс MURI предоставляет доступ к радиокомпьютеру, в котором Radio Platform является аппаратной частью, программная часть – это RCF, а URA – радиоприложения, запускаемые на радиокомпьютере. Ниже приведено описание каждого объекта в RRS-архитектуре.

CSL осуществляет доступ к радиокомпьютеру и предоставляет функциональность для инсталляции/деинсталляции, выбора и конфигурации программных компонентов, а также управления потоками данных [1]. CSL включает в себя следующие сущности [2]:

Administrator – осуществляет запросы на инсталляцию/деинсталляцию радиоприложений, а также на выделение и освобождение ресурсов для их запуска (creation and deletion of instance);

Mobility Policy Manager – осуществляет запросы на активацию и деактивацию URA, а

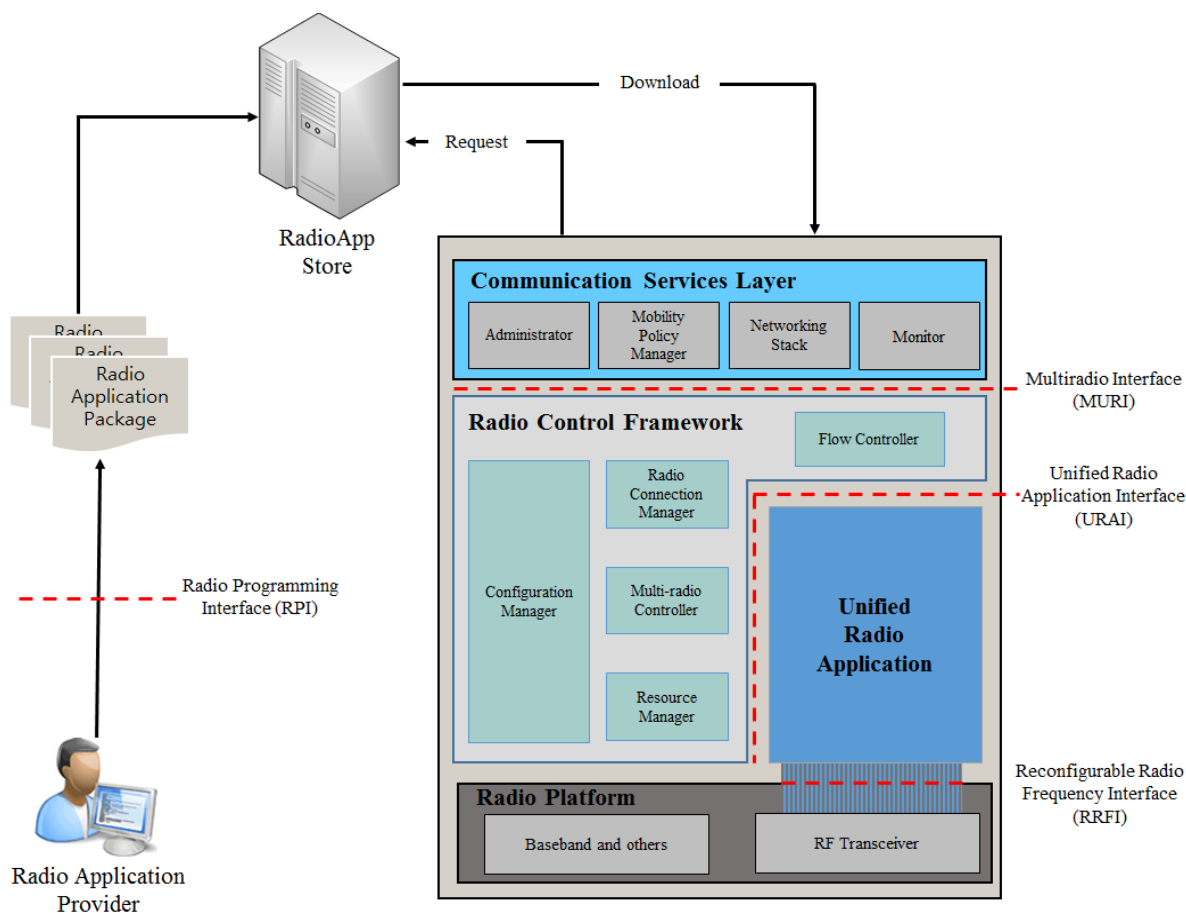


Рис. 1. Архитектура RRS

также на получение полного списка радиоприложений на радиоаппаратуре;

Networking Stack – занимается отправкой и приемом пользовательских данных;

Monitor – реализует передачу данных от радиоприложения пользователю или другому компоненту радиосистемы.

RCF управляет фактическим выполнением программного обеспечения с помощью функциональности, предоставленной CSL [1]. RCF содержит в качестве подсистем следующие сущности [2]:

Configuration Manager – наделен функциями инсталляции/деинсталляции радиоприложений, а также получения доступа к радиопараметрам отдельного URA;

Radio Connection Manager – активирует и деактивирует радиоприложения, в зависимости от запросов пользователя, а также управляет потоками пользовательских данных от одного радиоприложения к другому;

Flow Controller – посылает и принимает пакеты пользовательских данных, контролирует поток пакетов со служебными данными;

Multiradio Controller – осуществляет планирование запросов на радиоресурсы для URA, обнаруживает и устраняет неполадки при совместной работе нескольких URA;

Resource Manager – управляет вычислительными ресурсами для разделения их между несколькими работающими радиоприложениями, а также гарантирует выполнение URA в режиме реального времени.

URA представляет собой ПО (программное обеспечение), которое осуществляет генерацию радиочастотных сигналов, предназначенных для передачи, или декодирование полученных радиочастотных сигналов. Данное ПО загружается и устанавливается на целевую платформу [1]. Так как в перспективе все радиоприложения должны работать по определенному общему принципу, их называют унифицированными радиоприложениями [2].

Объект **Radio Platform** в архитектуре RRS является частью аппаратного обеспечения реконфигурируемого мобильного устройства, связанной с обработкой радиосигналов. В ее состав входят различные программируемые компонен-

ты, аппаратные ускорители, антенна и радиочастотный приемопередатчик [2].

Интерфейс RRFI осуществляет связь между URA и Radio Platform. Сервисы интерфейса делятся на следующие категории [3]: Spectrum Control Services, Power Control Services, Antenna Management Services, Tx/Rx Chain Control Services, RVM Protection Services.

Через интерфейс URAI происходит взаимодействие RCF и URA. Он обеспечивает типы сервисов [4]: Radio Application Management Services, User Data Flow Services, Multiradio Control Services.

Интерфейс MURI предоставляет доступ к радиокомпьютеру и координирует между собой CSL и RCF. Интерфейс предоставляет виды сервисов [5]: Administrative Services, Access Control Services, Data Flow Services.

Гармонизированный стандарт RRS и интерфейс MURI

Стандартизация интерфейса MURI является важной частью гармонизированного стандарта RRS.

Как упоминалось в разделе «Описание архитектуры RRS», данный интерфейс содержит в себе три типа сервисов [5]:

1) Administrative Services. Эти службы используют определенные приложения конфигурации устройства (например Administrator, который является частью CSL, используется для инсталляции/деинсталляции радиоприложений, а также выделения и освобождения ресурсов для их запуска). Функции-сервисы, включенные в тип:

– installRadioApps(): INTEGER. Administrator совершает запрос у Configuration Manager на инсталляцию радиоприложения;

– uninstallRadioApps(): INTEGER. Administrator совершает запрос у Configuration Manager на деинсталляцию радиоприложения;

– createRadioApps(): INTEGER. Для активации (запуска) инсталлированного радиоприложения оно должно быть подготовлено, т. е. ему необходимо выделить соответствующие ресурсы. Administrator запрашивает у Configuration Manager, можно ли определенному URA получить эти ресурсы, и тот обязан дать подтверждение или отрицательный ответ;

– delRadioApps(): INTEGER. Так как выделенные ресурсы для радиоприложений занимают память в реконфигурируемом мобильном устройстве, у некоторых URA можно «отнять» ресурсы, чтобы снабдить ими другие радиоприложения. Запрос для освобождения требую-

го URA от ресурсов совершает Administrator, и Configuration Manager также обязан дать положительный или отрицательный ответ;

– getRadioAppParameters(): RadioAppParameters. Administrator запрашивает у Configuration Manager предоставление параметров необходимого радиоприложения, таких как вычислительные/спектральные ресурсы, порты антенны и пр.;

– setRadioAppParameters(): BOOLEAN. Administrator запрашивает у Configuration Manager, имеется ли возможность установить в определенном радиоприложении предлагаемые значения радиопараметров;

– getListOfRadioApps(): RadioAppsList. В реконфигурируемом мобильном устройстве радиоприложение может иметь один из трех статусов: installed (инсталлировано), instantiated (радиоприложению выделены ресурсы для запуска), active (URA запущено). Administrator запрашивает у Configuration Manager полный список всех URA на устройстве, который обязан включать по крайней мере ID радиоприложений и их статус;

2) Access Control Services. Mobility Policy Manager использует данный вид сервисов для поддержания пользовательских политик и предпочтений, которые связаны с использованием различных технологий доступа к радио. Список функций, реализуемых в Access Control Services:

– activateRadioApps(): INTEGER. Mobility Policy Manager запрашивает у Radio Connection Manager запуск определенного радиоприложения, наличие положительного или отрицательного ответа обязательно;

– deactivateRadioApps(): BOOLEAN. Mobility Policy Manager запрашивает у Radio Connection Manager деактивацию определенного радиоприложения, наличие положительного или отрицательного ответа обязательно;

– getListOfRadioApps(): RadioAppsList. Mobility Policy Manager запрашивает у Configuration Manager полный список всех URA на устройстве, который обязан включать, по крайней мере, ID радиоприложений и их статус.

– startRadioMeasurement(): BOOLEAN. Радиоприложение может выполнять некоторые измерения либо автономно, либо по определенному триггеру. Во втором случае Mobility Policy Manager запрашивает у Radio Connection Manager, чтобы необходимое URA начало производить измерения радиосреды. В свою очередь, Radio Connection Manager обращается за этим к самому радиоприложению и принимает

от него положительный или отрицательный ответ, который возвращает инициатору запроса;

- stopRadioMeasurement(): RadioMeasurementList. Mobility Policy Manager запрашивает у Radio Connection Manager, чтобы необходимое URA прекратило производить измерения радиосреды. Radio Connection Manager обращается за этим к самому радиоприложению и принимает от него информацию об измерениях, которые передаются инициатору запроса;

- createAssociation(): INTEGER. Mobility Policy Manager запрашивает у Radio Connection Manager создание ассоциации определенного URA;

- terminateAssociation(): BOOLEAN. Mobility Policy Manager запрашивает у Radio Connection Manager завершение ассоциации определенного URA;

- createDataFlow(): INTEGER. Mobility Policy Manager отправляет к Radio Connection Manager запрос на создание потока данных к определенной ассоциации или из нее;

- terminateDataFlow(): INTEGER. Mobility Policy Manager отправляет к Radio Connection Manager запрос на прерывание потока данных к определенной ассоциации или из нее;

- changeDataFlow(): INTEGER. Иногда возникает необходимость перемещать потоки данных из одной ассоциации в другую, либо разделять поток некоторой ассоциации для нескольких других ассоциаций (разделяемые потоки), либо объединить поток данных нескольких ассоциаций в единую ассоциацию. Для этого Mobility Policy Manager обращается к Radio Connection Manager для перемещения, разделения или объединения потока данных;

- reportErrors(): void. В случае возникновения ошибок различного рода в RCF, Configuration Manager обязан отлавливать эти события и уведомлять Mobility Policy Manager;

3) Data Flow Services. Данный тип служб используется сетевым стеком реконфигурируемого мобильного устройства (например, TCP/IP). Услуги Data Flow Services являются набором логических услуг канального уровня, предоставляемых единым образом вне зависимости от того, какие URA активны, а какие нет. Функции в Data Flow Services:

- sendUserData(): BOOLEAN. Networking Stack обращается к Flow Controller для передачи пользовательских данных в одном из существующих потоков данных в реконфигурируемом мобильном устройстве. Flow Controller обязан дать ответ на запрос;

- receiveUserData(): UserData. Для получения данных пользователя через несколько пото-

ков Flow Controller возвращает для Networking Stack запрашиваемые данные с ID потока данных.

Особенности программной реализации MURI

При написании кода, реализующего интерфейс MURI, были решены следующие задачи:

- 1) определение структур CSL и RCF, а также их сущностей;

- 2) описание взаимодействия CSL и RCF;

- 3) реализация тестового URA;

- 4) выбор программных и аппаратных средств для реализации интерфейса.

Определение структур CSL и RCF, а также их сущностей

Очевидно, что CSL и RCF наиболее удобно описать в виде классов. Таким образом, разумно будет выбрать методологию ООП (объектно-ориентированное программирование). Все внутренние компоненты для каждого из этих двух объектов можно описать как nested-классы (классы, структура которых описывается внутри других классов, в данном случае это более «общие» классы CSL или RCF).

Особенность классов CSL, RCF и отдельных их компонентов состоит в том, что они не содержат своих данных, – эти структуры хранят в себе только методы-сообщения, которыми обмениваются сущности CSL и RCF, а данные передаются в методы в качестве параметров.

На рис. 2 изображена простая диаграмма UML, описывающая иерархию для CSL и его четырех сущностей.

Темно-серые ромбы на конце линий, идущих из классов сущностей CSL к главному классу CSL, означают, что эти классы-сущности содержатся в классе CSL.

Подобным образом проектируется иерархия для RCF. Таким образом, класс MURI, в который включены три его сервиса-подкласса, описанные в разделе «Гармонизированный стандарт RRS и интерфейс MURI», будучи «осведомленным» о внутренней организации CSL и RCF, может принимать сущности CSL и RCF в качестве аргументов в свои методы (инсталляции/деинсталляции радиоприложений и т. д.)

Приведем фрагмент кода из заголовочного файла, описывающий часть класса для Configuration Manager, входящего в состав RCF.

```
class CM //Describes the Configuration Manager
{
public:
```

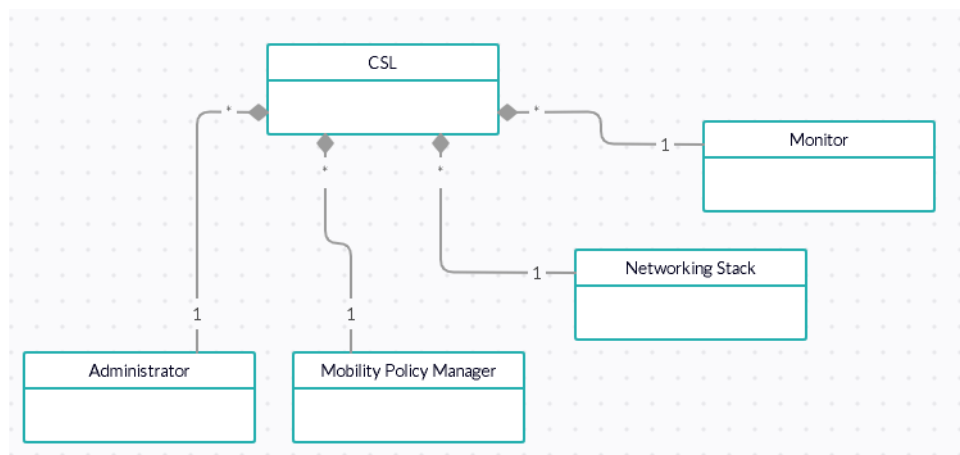


Рис. 2. Пример UML-диаграммы для CSL в реализации интерфейса MURI

```

CM(); //Constructor
~CM(); //Destructor

int InstantiateRACnf(Log &log, std::ofstream
&fout, RCF::RM &res_manager,
RCF::MRC &multiradio_controller,
RadioComputer &computer,
const std::string &URA_ID); //Method-
//confirmation of URA instantiation

int DeInstantiateRACnf(Log &log, std::ofstream
&fout, RadioComputer &computer,
const std::string &URA_ID); //Method-
//confirmation of URA deleting
instantiation

. . .
};

```

Описание взаимодействия CSL и RCF

CSL и RCF взаимодействуют через интерфейс MURI посредством сообщений. Чтобы имелась возможность управлять радиоприложениями, необходимо реализовать общение CSL и RCF в виде запросов-ответов.

В данном случае выгодно применять callback-функции (функции обратного вызова), которые завершают свое выполнение лишь после того, как другая функция, переданная им в качестве аргумента, возвращает свое значение. Таким образом, callback-функции позволяют организовать сколь угодно длинные цепочки посредников между инициатором запроса и его получателем, обязанным дать ответ на данный запрос.

Ниже приведен пример прототипа такой callback-функции, являющейся методом класса MPM (Mobility Policy Manager) для запроса к Configuration Manager с целью предоставления списка всех радиоприложений на конкретном радиокомпьютере.

```

std::list <RadioComputer::RadioPackage::RadioA
pp> ListRARReq(Log &log, std::ofstream &fout,
RCF::CM &config_manager,
const RadioComputer &computer,
std::list <RadioComputer::RadioPackage::RadioA
pp> (RCF::CM::*list) (Log&,
std::ofstream&,
const RadioComputer&)); //Method-request of
list with URA(s) from radio computer

```

Из представленного прототипа видно, что callback-функция запроса содержит в качестве одного из параметров указатель на функцию-подтверждение от Configuration Manager, который и предоставляет список радиоприложений на указанном в качестве константного параметра радиокомпьютере.

На рис. 3 изображен пример обмена сообщениями, который иллюстрирует передачу запросов и ответов при выделении ресурсов для запуска радиоприложения (URA instantiation).

Проследим последовательность действий на рис. 3. Во-первых, определим участников обмена сообщениями: Mobility Policy Manager, принадлежащий CSL, а также Configuration Manager, Resource Manager и Multiradio Controller, являющиеся частью RCF. Unified Radio Application в крайней правой части диаграммы означает само радиоприложение. В самом начале процедуры оно имеет статус «Installed», что означает факт его прошедшей инсталляции на радиокомпьютере.

Mobility Policy Manager совершает запрос к Configuration Manager с ID необходимого радиоприложения. Configuration Manager посылает запросы с данным ID к Resource Manager и Multiradio Controller, чтобы каждый из них выделил радиоприложению ресурс своего типа. Далее возможно несколько исходов развития событий:

Resource Manager и Multiradio Controller возвращают положительные ответы

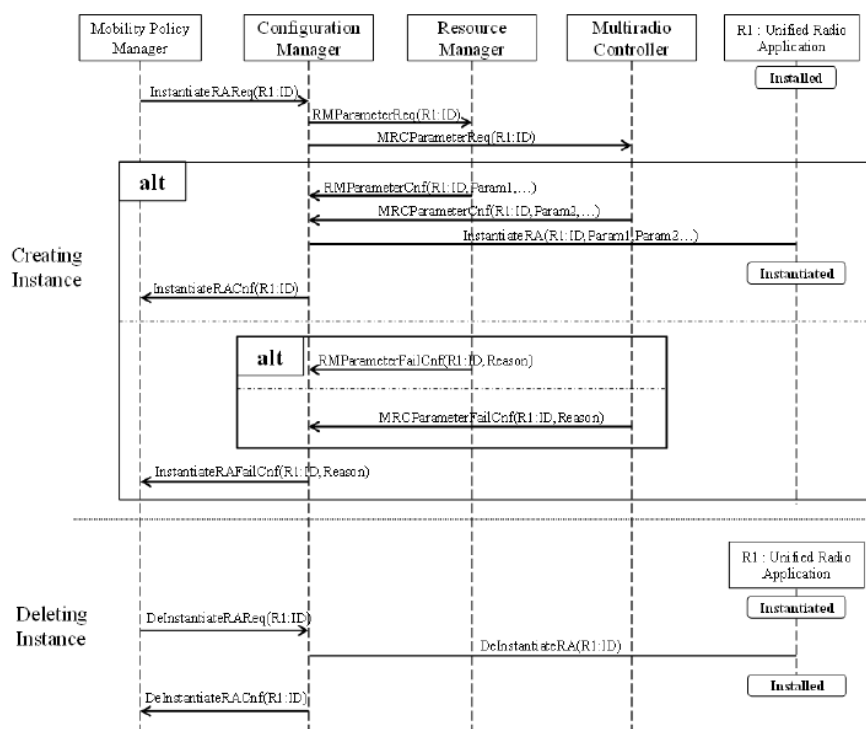


Рис. 3. Обмен сообщениями для URA instantiation

Configuration Manager, URA приобретает статус «Instantiated» (готово к запуску, ресурсы выделены), Configuration Manager уведомляет об успехе Mobility Policy Manager;

Resource Manager и Multiradio Controller возвращают отрицательные ответы Configuration Manager, Configuration Manager уведомляет о неудаче всей операции Mobility Policy Manager;

Configuration Manager сразу отказывает в осуществлении операции create of instantiation Mobility Policy Manager.

Реализация тестового URA

В программной реализации интерфейса MURI радиоприложение может быть описано в виде класса. Необходимо помнить, что работа интерфейса должна происходить с реальными радиоприложениями (бинарными модулями, процессами), работающими в отдельных адресных пространствах, поэтому в класс URA должна быть включена как можно более полная информация об активных или пока что не запущенных приложениях: ID радиоприложения, его статус (installed, instantiated, active), данные RAP (Radio Application Package) – радиопакета, без которого невозможна инсталляция URA, и т. д.

PID [6] (Process Identifier) каждого запущенного реального процесса также необходимо от-

слеживать в основной программе MURI, чтобы была возможность передавать ему данные по протоколу UDP (User Datagram Protocol) или деактивировать его.

Класс радиоприложения включен как nested-класс в класс радиопакета, так как именно RAP поступает на радиокomпьютер из Radio App Store, и в нем находится URA, которое будет инсталлировано. Во фрагменте программы, расположенном ниже, представлена часть описания класса радиоприложения, а именно – данные, которые в нем содержатся.

```

class RadioApp //Describes the unified radio
application
{
public:

class RadioAppOption //Describes options of URA
{
private:
    std::string Option_Name; //Name of the option
    std::string Option_Value; //Option's value
    for setting
    . . .
};

    std::string RadioAppID; //App's ID
    std::string RAVersion; //App's version
    std::string Status; //App's status
    std::string Vendor; //App's manufacturer

struct //Date's structure for app
{
    int Day; //Day of app's creating
  
```



```
int Month; //Month of app's creating
int Year; //Year of app's creating
}Date{};
std::vector<int> Bytes; //Describes the flow
of bytes in app
. . .
};
```

Выбор программных и аппаратных средств для реализации интерфейса

Наконец, после того как разработчик определился с основными структурами своей программы и способами их взаимодействия, а также составил алгоритм работы всего проекта, встает вопрос о том, какие средства лучше всего подходят для решения поставленной задачи.

Ниже приведена информация о текущей разработке интерфейса MURI.

Характеристики аппаратуры:

процессор – AMD E2-9000e RADEON R2;

количество ядер – 4 ;

тактовая частота – 1,5 ГГц;

оперативная память – 4 Гб;

операционная система – дистрибутив Linux Ubuntu 18.04.5 LTS;

разрядность операционной системы – 64-разрядная операционная система.

Характеристики программного обеспечения и данные по разработке проекта:

среда разработки – CLion 2020.2;

язык реализации – C++;

версия языка – 14;

количество файлов исходного кода – 42;

количество классов в программе – 24;

количество строк в исходном коде – 5190.

Заключение

В данной работе освещены основные аспекты реализации программной архитектуры реконфигурируемых радиосистем. Так как в новом гармонизированном стандарте RRS важнейшим вопросом является стандартизация мультимедиа интерфейса MURI, основной упор изло-

жения сделан на описании интерфейса, а также на его программной реализации.

Настоящая работа может быть полезна не только разработчикам RRS, но и техническим специалистам других направлений в среде программного обеспечения.

Библиографический список

1. ETSI White Paper No. 21. Software Radio Reconfiguration: A highly efficient and modular software reconfiguration approach for mobile devices. URL: <https://drive.google.com/file/d/1vjBrM1jSFH0rLlg7me8spJ4WEGYEQNI/view?usp=sharing> (дата обращения: 21.01.2021).

2. ETSI EN 303 095 V1.2.1 (2015-06). Reconfigurable Radio Systems (RRS); Radio Reconfiguration related Architecture for Mobile Devices. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303000_303099/303095/01.02.01_60/en_303095v010201p.pdf (дата обращения: 21.01.2021).

3. ETSI EN 303 146-2 V1.2.1 (2016-06). Reconfigurable Radio Systems (RRS); Mobile Device (MD) information models and protocols. Part 2: Reconfigurable Radio Frequency Interface (RRFI). URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303100_303199/30314602/01.02.01_60/en_30314602v010201p.pdf (дата обращения: 21.01.2021).

4. ETSI TS 103 146-3 V1.1.1 (2016-02). Reconfigurable Radio Systems (RRS); Mobile Device (MD) information models and protocols; Part 3: Unified Radio Application Interface (URAI). URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103100_103199/10314603/01.01.01_60/ts_10314603v010101p.pdf (дата обращения: 21.01.2021).

5. ETSI EN 303 146-1 V1.2.1 (2015-11). Reconfigurable Radio Systems (RRS); Mobile Device (MD) information models and protocols. Part 1: Multiradio Interface (MURI). URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303100_303199/30314601/01.02.01_60/en_30314601v010201p.pdf (дата обращения: 21.01.2021).

6. Лав Р. Linux. Системное программирование. 2-е изд. СПб.: Питер, 2014. 448 с.

УДК 004.02

С. И. Ковалёв*

кандидат технических наук, доцент

П. О. Винарь*

магистрант

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ ИЗ ГРАФОВ КЛЕТОК

Рассматривается метод построения низкоплотностных кодов с весом столбца проверочной матрицы, равным 2. Корректирующая способность конкретного низкоплотностного кода тесно связана с минимальной длиной замкнутого цикла на проверочной матрице этого кода. Предложен способ построения проверочной матрицы низкоплотностных кодов, состоящей из циркулянтов, построенных на основе совершенных разностных множеств. Показано, что минимальный цикл на проверочных матрицах для таких кодов равен 12.

Ключевые слова: низкоплотностные коды, LDPC-код, графы-клетки, разностное множество, избыточность.

S. I. Kovalev*

PhD, Tech., Associate Professor

P. O. Vinar*

Postgraduate Student

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE CONSTRUCTION OF LOW-DENSITY PARITY-CHECK CODES BASED ON THE GRAPH CELLS

We consider the construction of low-density codes with column weight of the check matrix is equal to 2. Corrective ability of a particular low-density code is closely connected with a minimum length of a closed loop test matrix of this code. A method for constructing a verification matrix of low-density codes consisting of circulants constructed on the basis of perfect difference sets is proposed. It is shown that the minimum cycle on the verification matrices for such codes is 12.

Keywords: low-density codes, LDPC, graph cells, difference set, redundancy.

Введение

Коды с низкой плотностью проверки на четность (LDPC-код)-это группа линейных блочных кодов [1], которые представлены матрицей $H = (h_{ij})$ размера $M \times N$, где количество ненулевых компонентов намного меньше, чем число нулевых компонентов. LDPC коды имеют высокую корректирующую способность, а их эффективность близка к пределу Шеннона [1]. Минимальное расстояние в кодах LDPC с весом столбца $j=2$ увеличивается логарифмически с ростом N , а при $j=3$ расстояние увеличивается линейно. При весе столбца равном 2 декодирование кода проще, чем при большем весе. Эффективность кодов с низкой плотностью проверки на четность зависит от многих параметров, например, от обхвата графа, связанного с проверочной матрицей, от длины кода и кодовой скорости.

LDPC-коды с весом столбца 2 можно получить из графов, которые называются клеткой.

Клетка – это экстремальный граф с минимальным числом вершин заданной степени для заданного обхвата графа. Обхватом графа называется длина минимального цикла в графе. Используя уже известные графы-клетки, можно получить наилучшие коды (по критерию длины минимального цикла в проверочной матрице) в классе кодов с весом столбца, равным 2.

Связь LDPC-кодов с графами

Проверочная матрица H размера $N \times M$ LDPC кода может быть описана двудольным графом Таннера, где множество вершин одной доли соответствуют столбцам проверочной матрицы, и множество вершин другой доли соответствуют ее строкам. Если в i -й строке проверочной матрицы есть 1 в g -й позиции, то между i -м узлом и g -м узлом другой доли имеется ребро. Любая замкнутая траектория в проверочной матрице, имеющая повороты в единичных позициях ма-

трицы, соответствует некоторому циклу в графе Таннера. Поэтому задача построения проверочных матриц без коротких замкнутых траекторий (циклов) тесно связано с разделом теории графов, посвященным построению графов с большим обхватом. Особенно интересным представляется применение в кодировании результатов теории графов, полученных в области построения экстремальных графов, имеющих минимальное количество вершин при заданном обхвате и валентности вершин.

Как известно [2], LDPC-коды могут быть построены из любого графа следующим образом. Пометим строки проверочной матрицы номерами вершин графа (от 1 до N). Все ребра графа также пронумерованы (от 1 до M). Каждый столбец проверочной матрицы будет соответствовать одному ребру графа. Если ребро с номером i соединяет вершины с номерами j и t , то в столбце проверочной матрицы с номером i имеются две единицы в строках с номерами j и t . Таким образом строится проверочная матрица с одинаковым весом всех столбцов, равным 2. Любой цикл в исходном графе содержит набор ребер. Каждому ребру из цикла можно поставить в соответствие отрезок вертикальной прямой в траектории на проверочной матрице. Эти вертикальные фрагменты траектории соединяются соответствующими горизонтальными отрезками прямой, так что любой цикл на исходном графе длины g отображается в замкнутую траекторию длины $2g$ на проверочной матрице. Пример кода, построенного из графа приведен на рис. 1.

На рис. 1, а слева показан исходный граф с пятью вершинами ($n=5$) и с 10 ребрами ($k=10$). Из данного графа можно построить проверочную матрицу размером $N=n$ и $M=k$. Проверочная матрица приведена на рис. 1(б). Поскольку в графе нет двойных ребер, минимальный размер цикла в нем равен 3. Это значит, что в проверочной матрице нет замкнутых траекторий с длиной меньше 6. Например, в графе есть цикл, проходящий через вершины с номерами 1, 3, 5. Соответствующий цикл в проверочной матрице выделен тоном.

Графы-клетки

Пусть (k, g) -клетка – это k -регулярный граф с обхватом g и с наименьшим возможным числом вершин. Нижняя граница (граница Мура) числа вершин n для заданных k и g зависит от того, является ли g нечетным или четным [3, 4]. Если g нечетно, то

$$n(k, g) = 1 + k + k(k-1) + \dots + k(k-1)^{(g-3)/2}.$$

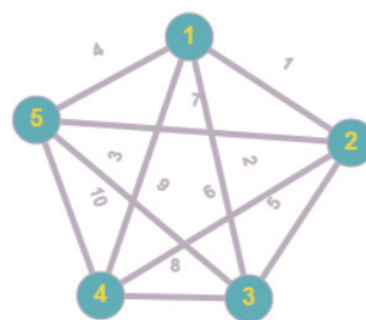
Если g четно, то

$$n(k, g) = 1 + k + k(k-1) + \dots + k(k-1)^{(g-2)/2}.$$

Однако такие границы удовлетворяются с равенством нечасто [5], а также нет единого подхода к построению произвольных клеток, но существует множество построенных клеток с определенными степенями вершин и обхватами.

Клетки с высокими степенями вершин труднее построить [5]. Однако в литературе есть много примеров таких клеток и некоторые алгоритмы построения [6, 7]. Обхват у соответствующих кодовых матриц равен $2g$. Высокие вершинные степени увеличивают скорость передачи данных, но сложность декодирования при этом увеличивается. Параметры некоторых известных графов-клеток представлены в табл. 1.

Графы-клетки отличаются методами построения и структурой. На рис. 2 показан граф-клетка $(6,4)$ из которого получаем LDPC код ($M=36, N=12$) с проверочной матрицей, имеющей минимальную длину цикла 8. Данный граф является примером семейства графов-клеток с $g=4$ и $n=2k$. В [2] указывается, что из этих графов можно получать проверочные матрицы с мини-



а)

1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
0	0	0	1	0	0	1	0	1	0

б)

Рис. 1. LDPC-матрица (б), полученная из графа (а)

Таблица 1

Некоторые известные графы-клетки

(k, g)	$n(k, g)$	Code size $(M \times N) = (n \times \frac{nk}{2})$	Обхват (2g)
(3, 8)	30	30×45	16
(4, 9)	275	275×550	18
(5, 7)	152	152×380	14
(6, 8)	312	312×936	16
(7, 5)	50	50×175	10

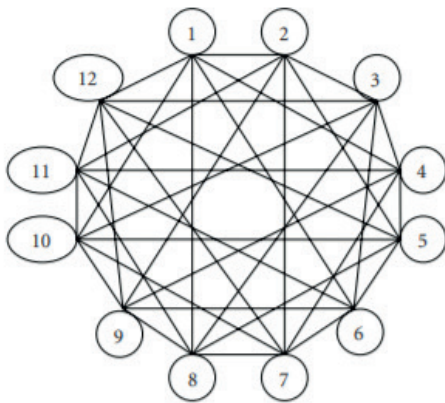


Рис. 2. Граф клетка (6,4)

100000	100000	100000	100000	100000	100000
010000	010000	010000	010000	010000	010000
001000	001000	001000	001000	001000	001000
000100	000100	000100	000100	000100	000100
000010	000010	000010	000010	000010	000010
000001	000001	000001	000001	000001	000001
100000	000001	000010	000100	001000	010000
010000	100000	000001	000010	000100	001000
001000	010000	100000	000001	000010	000100
000100	001000	010000	100000	000001	000010
000010	000100	001000	010000	100000	000001
000001	000010	000100	001000	010000	100000

Рис. 3. Матрица графа-клетки (6,4)

I	I	I	I	I	I
I	C5	C4	C3	C2	C1

Рис. 4. Компактный вид матрицы H

мальным циклом 8, представляемые в виде набора матриц циклических перестановок.

Матрицу рис. 3 можно представить в компактном матричном виде, показанном на рис. 4.

Проверочные матрицы LDPC-кодов, составленные из матриц циклических перестановок,

называются квазициклическими LDPC-кодами (QC-LDPC).

Здесь подматрица C_i означает матрицу циклической перестановки, имеющую единицу в первой строке на позиции i . Далее мы опишем универсальную конструкцию, позволяющую строить QC-LDPC коды с минимальным циклом длины 12. Аналогичные по параметрам коды предложены в [3]. В этой работе коды строились из графов Таннера, которые в свою очередь конструировались с помощью сложной алгебраической конструкции. В нашей работе мы предлагаем очень простой подход к построению таких кодов, не требующий ничего, кроме готовой таблицы совершенных разностных множеств.

Метод построения кодов LDPC с помощью совершенных разностных множеств

Множество из k целых чисел (d_1, \dots, d_k) называется (совершенным) разностным (v, k, λ) -множеством, если при делении разностей $d_i - d_j$, $i \neq j$ на целое число v каждый из остатков $1, 2, \dots, v-1$ встречается ровно λ раз.

Разностное множество, для которого $\lambda = 1$ называется плоским. Плоское разностное множество, для которого $p = p - \lambda$, эквивалентно проективной плоскости порядка p . Проективная плоскость этого вида называется циклической. В табл. 2 приведены некоторые плоские разностные множества, для нескольких первых значений p , где M -столбцы проверочной матрицы, N -избыточность кода. Значение v получается из формулы:

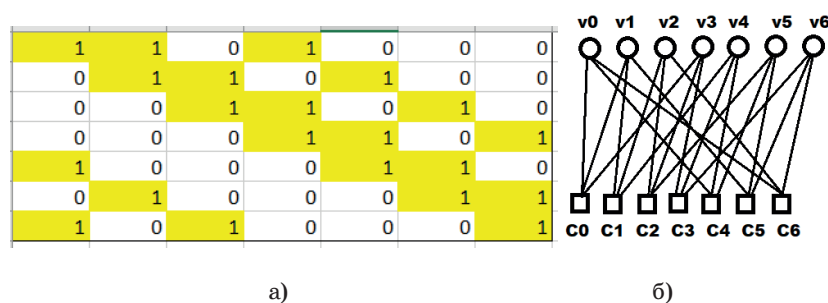
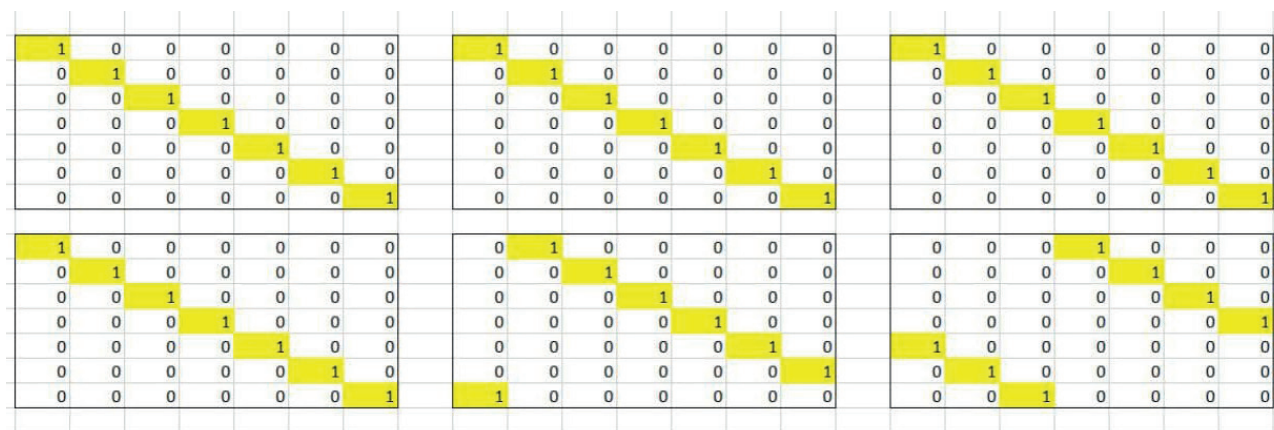
$$v = p^2 + p + 1.$$

Рассмотрим пример плоского разностного множества $\{0, 1, 3\}$, где $p=2$, $v=7$. На рис. 5, а изображена циклическая матрица, построенная из совершенного разностного множества. Рассмотрим первую строку данной матрицы. Разностное множество равно $\{0, 1, 3\}$ соответствует позициям единиц в первой строке. Минимальный цикл в такой матрице не может быть равен 4,

Таблица 2

Плоские разностные множества

p	v	Плоское разностное множество	Обхват	$M=v \cdot (p+1)$	$N=2v$
2	7	$\{0, 1, 3\}$	12	21	13
3	13	$\{0, 1, 3, 9\}$	12	48	25
2^2	21	$\{0, 1, 4, 14, 16\}$	12	84	41
5	31	$\{0, 1, 3, 8, 12, 18\}$	12	186	61

Рис. 5. Матрица размером 7×7 (а); двудольный граф (б)Рис. 6. Матрица, состоящая из трех циркулянтов и $v=7$

I	I	I
C0	C1	C3

Рис. 7. Компактный вид матрицы рис. 6

так как не существует таких строк, имеющих единицы в двух одинаковых позициях. Следовательно, минимальный цикл в этой матрице равен 6.

Данные матрицы, построенные из разностных множеств тесно связаны с графами-клетками, имеющими обхват 6. Действительно, предположим, что мы имеем двудольный граф с размерами долей 7 и 7. Доли нумеруются цифрами от 1 до 7. Номера вершин одной доли соответствуют строчкам матрицы рисунка 5а, а номера вершин второй доли соответствуют столбцам. Вершина с номером i в одной доле соединена с вершиной с номером j в другой доле, если на пересечении i -й строки и j -го столбца в матрице имеется 1. Легко увидеть, что любой цикл в двудольном графе соответствует циклу на связанной с ним матрице, полученного из разностного множества (рис. 5б).

Представим матрицу рис. 4 в виде суммы трех матриц циклических перестановок C_0 , C_1 , C_3 .

Сформируем проверочную матрицу QC-LDPC, таким образом, что первая полоса подматриц состоит из единичных матриц, а вторая полоса из циркулянтов C_0 , C_1 , C_3 . Данная матрица представлена на рис. 6 и соответствует QC-LDPC коду длины 21 с числом проверочных символов не более 14. В данной проверочной матрице отсутствуют циклы с длиной менее 12.

В компактном виде матрица представлена на рис. 7.

Библиографический список

1. On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit / S.-Y. Chung, G. D. Forney Jr., T. J. Richardson, and R. Urbanke. IEEE Communications Letters. 2001. Vol. 5, № 2. P. 58–60.
2. Malema G., Liebelt M. High Girth Column-Weight-Two LDPC Codes Based on Distance Graphs // J. Wireless Com. Network. 2007. № 048158.
3. Song H., Liu J., Vijaya Kumar. BVK: Large girth cycle codes for partial response channels // IEEE Transactions on Magnetics. 2004. № 40 (4, part 2).

4. *Exoo G.* A simple method for constructing small cubic graphs of girths 14, 15, and 16 // *Electronic Journal of Combinatorics*. 1996. Vol. 3, № 1. P. 1–3.

5. *Wong P.* Cages survey // *Journal of Graph Theory*. 1982. Vol. 6. P. 1–22.

6. *Meringer M.* Fast generation of regular graphs and construction of cages // *Journal of Graph Theory*. 1999. Vol. 30, № 2. P. 137–146.

7. *Weisstein E.* Cage graph. From MathWorld-A Wolfram Web Resource. URL: <http://www.mathworld.wolfram.com/CageGraph.html> (дата обращения: 18.12.2020).

УДК 004.021

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-284-292

В. Л. Оленев*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПРОТОКОЛА СТП ИСС ДЛЯ БОРТОВЫХ СЕТЕЙ SPACEFIBRE

Представлен подход к применению к сетям SpaceFibre транспортного протокола СТП-ИСС, разработанного для сетей связи SpaceWire. Дается краткий обзор транспортного протокола СТП-ИСС и описывается его использование для бортовых сетей SpaceWire. Затем в документе описывается, как применять СТП-ИСС для сетей SpaceWire следующего поколения – сетей SpaceFibre. Основная задача статьи – показать, что СТП-ИСС необходим и может успешно работать в сетях SpaceFibre. Кроме того, в статье представлены возможные решения для совместного использования SpaceFibre и СТП-ИСС, а также описаны преимущества применения такого подхода для пользователей.

Ключевые слова: СТП-ИСС, SpaceFibre, бортовые сети, качество сервиса.

V. L. Olenev*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

APPLICATION OF STP-ISS TRANSPORT PROTOCOL FOR SPACEFIBRE ON-BOARD NETWORKS

The paper provides an approach for the application of transport protocol STP-ISS developed for SpaceWire communication networks to the SpaceFibre networks. Authors give a short overview of the transport protocol STP-ISS, and describe how it is used for SpaceWire on-board networks. Then the paper describes how to apply STP-ISS for the next generation of SpaceWire networks – SpaceFibre. The main task of the paper is to prove that STP-ISS may successfully operate over SpaceFibre network. In addition current paper provides the possible solutions for the SpaceFibre and STP-ISS joint use and describes what benefits a user can archive from this.

Keywords: STP-ISS, SpaceFibre, onboard networks, quality of service.

SpaceWire – это сетевая технология, специально разработанная для космических аппаратов и совмещающая в себе простоту и низкую цену реализации наравне с высокой производительностью и гибкостью архитектуры [1]. Технология SpaceWire активно интегрируется в новые космические аппараты и уже использовалась во многих важных миссиях большинством крупных космических агентств мира. Стандарт протокола SpaceWire охватывает три нижних уровня модели OSI и не предоставляет услуг транспортного уровня. Существует ряд транспортных протоколов, таких как RMAP [2], CCSDS PTP [3], STUP [4], JRDDP [5], SpaceWire-D [6], SpaceWire-R и СТП-ИСС [7], которые были созданы для работы в сетях SpaceWire. Подробный обзор и анализ этих протоколов представлен в [8]. Результат сравнения этих протоколов показывает, что в настоящее время только протокол СТП-ИСС обеспечивает различные типы качества сервиса, гарантированную доставку данных и гибкость конфигурации. Поэтому СТП-

ИСС выглядит лучшим унифицированным решением как протокол транспортного уровня для сетей SpaceWire. Кроме того, его можно использовать для гигабитной реализации сетей SpaceWire – GigaSpaceWire [9].

В 2019 г. была официально выпущена спецификация протокола SpaceFibre. SpaceFibre [10] – это следующее поколение сетевых технологий SpaceWire. Он осуществляет передачу данных по электрическим или оптоволоконным кабелям, работает на очень высоких скоростях передачи данных и обеспечивает встроенные функции качества сервиса (QoS) и обнаружения неисправностей, изоляции и восстановления (FDIR), обеспечивая высокую надежность и высокую доступность [11]. Поскольку стандарт является совершенно новым, не существует протоколов транспортного уровня, разработанных для SpaceFibre. Цель статьи – проанализировать необходимость и возможность применения транспортного протокола СТП-ИСС для сетей SpaceFibre.

Общее описание СТП-ИСС

СТП-ИСС – это протокол транспортного уровня для сетей SpaceWire, который регламентирует взаимодействие между бортовыми устройствами, описывает форматы пакетов и правила передачи пакетов для сетей SpaceWire и GigaSpaceWire. Место протокола СТП-ИСС в семействе стандартов SpaceWire и соответствие модели OSI [12] показано на рис. 1. Протокол СТП-ИСС соответствует транспортному уровню. Он предоставляет средства для передачи данных между конечными узлами сети с требуемыми типами качества сервиса и приоритетами потока данных. Протокол имеет механизмы для повторной отправки данных в случае обнаружения ошибок в принятом пакете.

СТП-ИСС обеспечивает передачу следующих типов данных через свои интерфейсы: управляющие команды, пакеты данных, временные коды SpaceWire, распределенные прерывания SpaceWire и их подтверждения. Конфигурационный интерфейс предоставляет средства для изменения параметров конфигурации СТП-ИСС, передачи информации о состоянии и передачи команд сброса, установки транспортных соединений.

Одной из основных задач СТП-ИСС является обеспечение передачи сообщений от приложений к удаленным узлам сети SpaceWire. Существует два типа сообщений от приложения: срочные сообщения (более высокий приоритет) и обычные сообщения (более низкий приори-

тет). Сообщения приложений инкапсулируются в пакеты SpaceWire на транспортном уровне.

Длина каждого блока данных сообщения должна быть не менее 1 байта и не должна превышать 2048 байтов для передачи данных без установления соединения, и максимум 64 Кбайт для передачи данных с установкой соединения.

Протокол СТП-ИСС имеет специальный таймер времени жизни пакета, который подсчитывает время, когда пакет еще актуален в сети SpaceWire. Каждый пакет сохраняется в буфере передатчика в течение его времени жизни. Значение времени жизни таймера является параметром конфигурации СТП-ИСС, и его можно установить на этапе настройки. Каждый тип пакета может иметь разные значения времени жизни таймера.

Сторона передатчика протокола имеет отдельные буферы для каждого приоритета передаваемых данных: буфер команд управления, буфер срочных сообщений, буфер обычных сообщений. Если происходит переполнение буфера, приложение должно подождать, пока освободится свободное место для сообщения.

Приемная сторона транспортного протокола СТП-ИСС имеет два логических буфера. Первый буфер используется для передачи данных без установки соединения (все типы пакетов) [7]. Второй буфер предназначен только для передачи данных с установкой соединения. Принимающая сторона должна резервировать необходимое место в буфере для каждого нового соединения. Второй буфер будет разделен на несколько меньших буферов, равных количеству транспортных соединений. Если один из приемных буферов заполнен, то СТП-ИСС должен сообщить об этом на уровень приложения и отбросить все пакеты, поступающие из SpaceWire.

Существует два дополнительных управляющих сигнала, которые могут передаваться от прикладного уровня в СТП-ИСС через интерфейс конфигурации: Reset и Flush. Reset соответствует горячему сбросу, а Flush используется для очистки приемного и передающего буфера. Когда СТП-ИСС получает команду Reset, он должен очистить буферы передачи и приема, остановить все таймеры, соответствующие удаленным пакетам, завершить все транспортные соединения и удалить всю связанную информацию, установить все параметры конфигурации в настройки по умолчанию. Команда Flush означает просто очистку буферов передачи и приема и остановку всех таймеров, соответствующих этим удаленным пакетам.

Одним из преимуществ СТП-ИСС является возможность передачи данных с использовани-

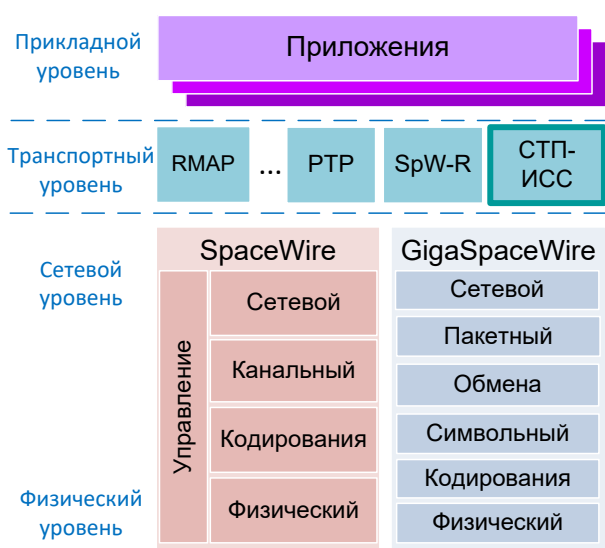


Рис. 1. Протокол СТП-ИСС в стеке протоколов SpaceWire

ем следующих типов качества обслуживания: приоритеты, гарантированная доставка, негарантированная доставка, планирование.

Механизмы предоставления качества сервиса в СТП-ИСС

Тип качества сервиса «С приоритетом» является основным и должен поддерживаться всеми устройствами, на которых реализован транспортный протокол СТП-ИСС. Согласно данному типу качества сервиса данные с более высоким приоритетом должны быть переданы первыми. СТП-ИСС анализирует передачу пакетов во время арбитражного.

Тип качества сервиса «Гарантированная доставка данных» обеспечивает подтверждение корректной доставки данных посредством отправки пакетов подтверждения, а также повторную пересылку данных источником в случае отсутствия подтверждения. Это называется механизм пересылки. Таймеры повторной отправки и успешные подтверждения передачи обеспечивают гарантированную доставку.

Для реализации качества сервиса «Гарантированная доставка данных», при отправке данных на сетевой уровень должен быть взведен таймер повтора. Он определяет временной интервал, по истечению которого считается, что пакет не был доставлен до адресата корректно, либо был потерян пакет подтверждения. По истечению таймера повтора пакет, соответствующий данному таймеру, повторно отправляется адресату.

При приеме пакета подтверждения, пакет, соответствующий принятому номеру, должен быть удален из буфера повтора передатчика. Все таймеры, ассоциированные с номером этого пакета, должны быть остановлены и удалены.

Протокол СТП-ИСС обеспечивает обнаружение повторных команд управления на приемнике. Повторная команда управления может возникнуть в случае потери пакета подтверждения. Приемник должен хранить историю последних полученных команд управления. Информация о каждой команде управления должна сопровождаться таймером. По истечению таймера информация о команде управления удаляется из истории, хранящейся в приемнике.

Тип качества сервиса «Негарантированная доставка данных» обеспечивает передачу данных без подтверждений приема. Таким пакетам не нужны таймеры повтора. При приеме информационного пакета, не требующего подтверждения, приемник также проверяет CRC и корректность длины поля данных, но в случае

обнаружения ошибки в принятом информационном пакете, и в случае, если пакет был завершён символом ЕЕР (ошибочный конец пакета), данные пакета все равно должны быть переданы на прикладной уровень с уведомлением об ошибке.

Планирование подразумевает наличие единого расписания для всей сети SpaceWire. Это расписание дает возможность узлу отправлять данные только во время конкретных временных интервалов. Расписание, длительность временного интервала и длительность эпохи устанавливаются на этапе конфигурации протокола и хранятся в каждом узле. Эпоха содержит постоянное количество временных интервалов. Таблица расписания описывает одну эпоху. Каждая эпоха содержит одно и то же количество временных интервалов. Основные принципы построения таблиц расписания для СТП-ИСС показаны в [13].

Таймер временных интервалов считает длительность текущего временного интервала для конкретного узла. Новый временной интервал начинается, если таймер завершил работу. Истечение таймера эпохи и принятие нового тайм-кода говорит о том, что начинается новая эпоха, в которой счетчик временных интервалов будет считать временные интервалы, начиная с нуля. Когда узел получает тайм-код, он не анализирует его номер. Начало новой эпохи соответствует факту получения тайм-кода.

Есть две ситуации, которые могут возникнуть в сети: следующий тайм-код получен перед или после срабатывания таймера последнего временного интервала эпохи. Это означает, что внутренний таймер интервала и таймер мастера времени не синхронно работают. Следовательно, узел должен начинать синхронизацию. Синхронизация выполняется один раз в эпоху. Во время синхронизации узел должен вычислять новое значение для таймера временных интервалов. Новое значение должно быть применено для таймера во время следующего временного интервала. Новая эпоха должна начаться, когда тайм-код получен.

Есть K временных интервалов каждой эпохи, в течение которых полученный тайм-код считается актуальным. Эти временные интервалы называются Окном актуальности временного интервала. Если тайм-код получен перед последними $K/2$ тайм-слотов эпохи, или после первых $K/2$ тайм-слотов эпохи, тогда этот тайм-код рассматривается, как неактуальный и синхронизация не выполняется (рис. 2).

Если таймер последнего временного интервала эпохи истекает одновременно с принятием

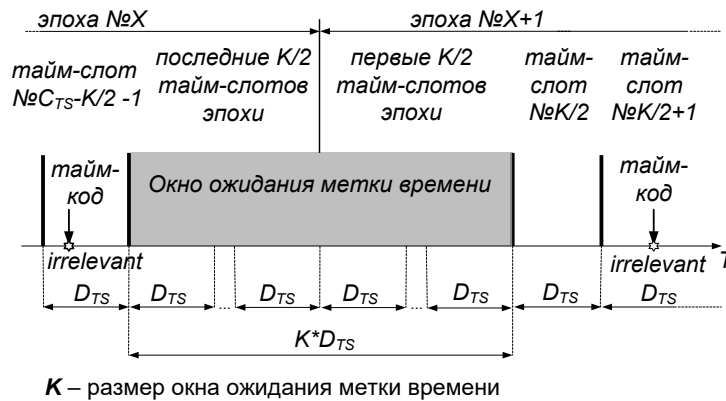


Рис. 2. Пример получения неактуального временного кода

тайм-кода, тогда значение таймера корректировать не нужно.

СТП-ИСС должен считать количество полученных неактуальных тайм-кодов. Получение неактуальных тайм-кодов в трех эпохах подряд означает, что мастер времени и локальный таймер временных интервалов очень сильно рассинхронизированы. В таком случае нам необходимо синхронизироваться. Получение третьего неактуального тайм-кода приравнивается к началу новой эпохи. Узел должен прервать отсчет таймера временного интервала и ждать получения следующего тайм-кода. В эту эпоху узел не должен передавать никакие данные. После получения нового тайм-кода, узел обновляет длительность временного интервала, и продолжить передачу данных в соответствии с расписанием.

Передача данных с установкой соединения в СТПИСС

Передача данных с установкой соединения дает возможность передавать большие объемы данных с минимальными накладными расходами. Только срочные пакеты и обычные пакеты данных могут передаваться по транспортному соединению. Максимальное количество транспортных соединений должно быть не более 8 в одну сторону. Каждое транспортное соединение является однонаправленным: оно соединяет передатчик узла инициатора с приемником удаленного узла.

Приложение, которому нужно передавать или принимать большие объемы данных, должно инициировать установку транспортного соединения. Максимальный объем передаваемых данных, которые идут по транспортному соединению, 64 Кб. Установка транспортного соединения выполняется посредством классического трехфазного протокола [7, 14].

Во время установки транспортного соединения устанавливаются следующие параметры:

- номер транспортного соединения;
- тип передаваемых данных;
- направление передачи данных (инициатор установки может выбрать, какая сторона будет передавать данные после установки);
- качество сервиса Гарантированная передача данных или Негарантированная;
- максимально возможный объем передаваемого пакета;
- резервирование свободного места в буфере приемника (считается в количестве сообщений).

Удаленный узел проверяет, может ли он установить соединение с такими параметрами и отвечает подтверждением или отказом. После успешной установки соединения узел, который был выбран как передающий данные, начинает слать пакеты. Закрытие соединения инициируется приложением, которое было инициатором установки.

Управление потоком выполняется посредством отправки информации о количестве свободного места в буфере приемника. Этот механизм применяется только для транспортных соединений с гарантированной доставкой данных.

Принимающий узел во время установки транспортного соединения должен резервировать запрошенное буферное пространство и считать его. Каждое транспортное соединение имеет счетчик свободных кредитов и счетчик использованного пространства в буфере. Информация о свободном месте в буфере должна отправляться в пакете подтверждения. В случае, если свободное пространство меняется после отправки пакета подтверждения (например, приложение считало данные из буфера), то приемник отправляет пакет подтверждения с особым флагом, который сообщает, что это не пакет подтверждения, а информация о новом значе-

нии счетчика кредитов. В свою очередь, передающий узел считает количество данных, которое может быть отправлено с использованием кредитов для каждого транспортного соединения.

Потеря или повреждение пакета подтверждения может повлечь за собой потерю информации о новых кредитах в приемнике. Чтобы избежать этого, СТП-ИСС предоставляет механизм синхронизации кредитов.

Важной особенностью протокола СТП-ИСС является его гибкость. Протокол имеет ряд конфигурационных параметров, которые позволяют настраивать протокол в зависимости от требований к качеству предоставляемого сервиса и типа используемой аппаратуры. Конфигурация протокола СТП-ИСС производится через конфигурационный интерфейс. В протоколе СТП-ИСС определено 13 конфигурационных параметров.

Гибкость при конфигурации дает возможность отключать или даже не реализовывать отдельные механизмы СТП-ИСС. Таким образом, СТП-ИСС имеет много различных профилей реализации [7], что, несомненно, полезно для различного типа узлов сети, к которым та или иная функциональность может быть не применима.

Применение СТП-ИСС для сетей SpaceFibre

Спецификация SpaceFibre гласит, что протокол RMAP для удаленного доступа к памяти может работать поверх SpaceFibre. Однако функциональности RMAP недостаточно для решения всех задач бортовых сетей. Протокол RMAP предназначен только для удаленного доступа к памяти и не обеспечивает никакого качества сервиса. С помощью RMAP можно обеспе-

чить только базовые операции записи или чтения. Так что СТП-ИСС – гораздо более мощное решение.

Эффективность протокола СТП-ИСС была подтверждена специалистами европейских и российских космических компаний, внедрявшими имитационные модели [15], рабочее место аппаратно-программной отработки [16] и аппаратный имитатор бортового программного обеспечения [17]. Способ использования протокола СТП-ИСС в сетях SpaceFibre показан на рис. 3.

Каждый виртуальный канал SpaceFibre поддерживает следующие качества обслуживания: приоритет, резервирование полосы пропускания, планирование. В свою очередь, объекты СТП-ИСС в узлах поддерживают следующее QoS: негарантированная доставка, гарантированная доставка, приоритет, планирование. Но СТП-ИСС и SpaceFibre обеспечивают качество сервиса на разных уровнях.

Нужно учитывать, что СТП-ИСС предназначен для работы end-to-end (E2E) и обеспечения качества сервиса для всей сети, а текущая версия SpaceFibre в основном описывает работу на уровне канала передачи данных, поэтому качество сервиса предоставляется для связи точка-точка. Другой важный момент – это ограниченное количество виртуальных каналов (VC) и виртуальных сетей (VN) в SpaceFibre. Стандарт требует до 32 VC в канале, но возможности реализации часто ограничивают это число. Таким образом, несколько независимых информационных потоков будут передаваться в некоторых VC. Механизмы качества сервиса SpaceFibre работают между VC, но не в отдельном VC. То же самое для VN. Для VN с несколькими передатчиками SpaceFibre не обеспечивает управление

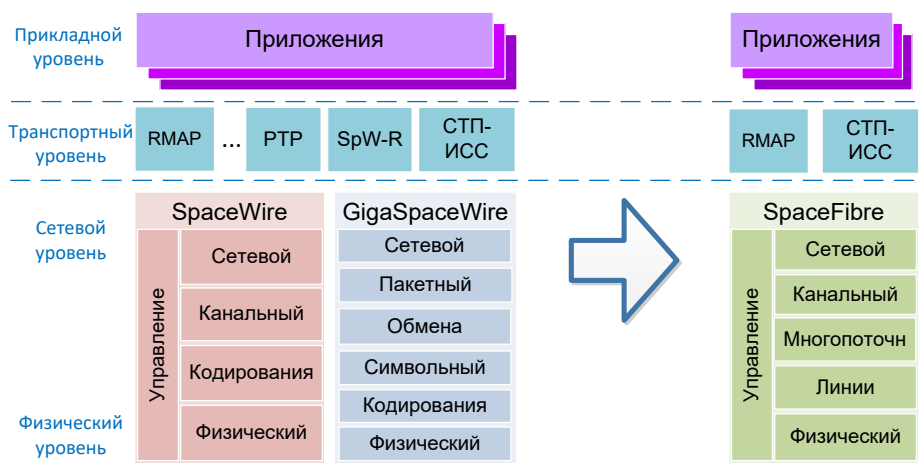


Рис. 3. СТП-ИСС для сетей SpaceFibre

качеством сервиса в нем, оно обеспечивает качество сервиса только между VN. Совместное использование протоколов SpaceFibre и СТП-ИСС в бортовых сетях может быть очень мощным и гибким решением.

Рассмотрим, какие преимущества СТП-ИСС может добавить к SpaceFibre. Использование качества сервиса СТП-ИСС с максимальным усилием дает возможность использовать чистое качество обслуживания SpaceFibre без каких-либо дополнительных механизмов.

SpaceFibre гарантирует доставку точку-точка, но не может гарантировать сквозную доставку, потому что может произойти сбой внутри маршрутизатора или канала. Такой тип ошибки может быть обработан гарантированным качеством сервиса СТП-ИСС. Если SpaceFibre передает данные в непрерывном режиме, некоторые пакеты могут быть удалены из буфера виртуального канала (VC). СТП-ИСС повторно отправит эти пакеты E2E.

Качество сервиса «с приоритетом» СТП-ИСС на транспортном уровне позволяет приложениям отправлять различные типы пакетов (срочные, обычные сообщения и команды управления) через один VC в одну виртуальную сеть (VN). Следовательно, бортовая сеть может иметь виртуальные сети с несколькими исходными узлами и различным качеством сервиса.

Качество сервиса «Планирование» СТП-ИСС планирует объекты конечных узлов, а SpaceFibre планирует VC, поэтому планирование СТП-ИСС обеспечивает разделение качества сервиса между потоками информации в VN в случае нескольких передатчиков.

В отличие от некоторых других бортовых сетей (например, AFDX, [18]), сеть SpaceFibre может иметь виртуальную сеть с несколькими передатчиками. Это обусловлено особенностями ее использования. Планирование в СТП-ИСС может использоваться для управления передачей данных от нескольких инициаторов конечного узла.

При отображении в сеть SpaceFibre сеть SpaceWire представлена виртуальной сетью. Типичным случаем для сети SpaceWire является то, что несколько исходных узлов обычно отправляют данные одному или нескольким получателям. Во время обновления сетей SpaceWire до сетей SpaceFibre было бы проще виртуализировать сеть SpaceWire с несколькими исходными узлами в сети SpaceFibre. Эта виртуальная сеть будет иметь несколько узлов-инициаторов. Лучше использовать планирование СТП-ИСС для управления передачей данных. Он будет использоваться для обеспечения равномерной до-

ставки данных из нескольких независимых информационных потоков в узлы назначения.

Помимо этого, если аппаратные ресурсы ограничены, мы не можем иметь много виртуальных сетей. Из-за ограниченных аппаратных ресурсов в реальных реализациях сети потоков данных намного больше, чем количество реализованных виртуальных каналов. С помощью качества сервиса СТП-ИСС разработчики сети смогут разместить несколько инициаторов в одной виртуальной сети.

СТП-ИСС поможет решить проблему зависания пакетов в виртуальной сети SpaceFibre. СТП-ИСС отбрасывает пакет в случае, если приложение не считывает данные из буфера приема (и он заполняется). Сброс пакета освобождает сетевые ресурсы, так что другие пакеты могут быть переданы.

Следующий важный вопрос – как портировать протокол СТП-ИСС для сетей SpaceFibre. Это можно сделать, так как точки доступа к сервису СТП-ИСС будут такими же, как и для SpaceWire. СТП-ИСС использует значение «EndPoint» в примитивах между транспортным и сетевым уровнями, поэтому вместо EndPoint можно отправить номер виртуального канала (VN #):

Примитив для SpaceWire: NL_SendPacket.req (End-point, SpaceWirePacket)

Примитив для SpaceFibre (модификация): NL_SendPacket.req (VN#, SpaceWirePacket)

Более того, нет разницы, использовать аппаратную или программную реализацию СТП-ИСС поверх SpaceFibre. Нет необходимости обновлять приложения, которые работают поверх СТП-ИСС в сетях SpaceWire, поскольку все изменения связаны с интерфейсом транспортного уровня СТП-ИСС с сетевым уровнем.

Другим положительным аспектом является то, что СТП-ИСС имеет различные профили реализации, поэтому, если нет необходимости реализовывать некоторые функции СТП-ИСС или качество сервиса поверх SpaceFibre, то можно его не реализовывать. Например, передача с установкой соединения, обнаружение дублирующих команд управления и т. д.

Одним из ключевых вопросов является то, как использовать планирование СТП-ИСС и планирование SpaceFibre одновременно в одной сети. СТП-ИСС использует временные коды SpaceWire для синхронизации в конечных узлах. Следовательно, существует необходимость в реализации механизма для преобразования временных кодов SpaceWire в широкоовещательные сообщения SpaceFibre и наоборот. Кроме того, СТП-ИСС и SpaceFibre могут использовать

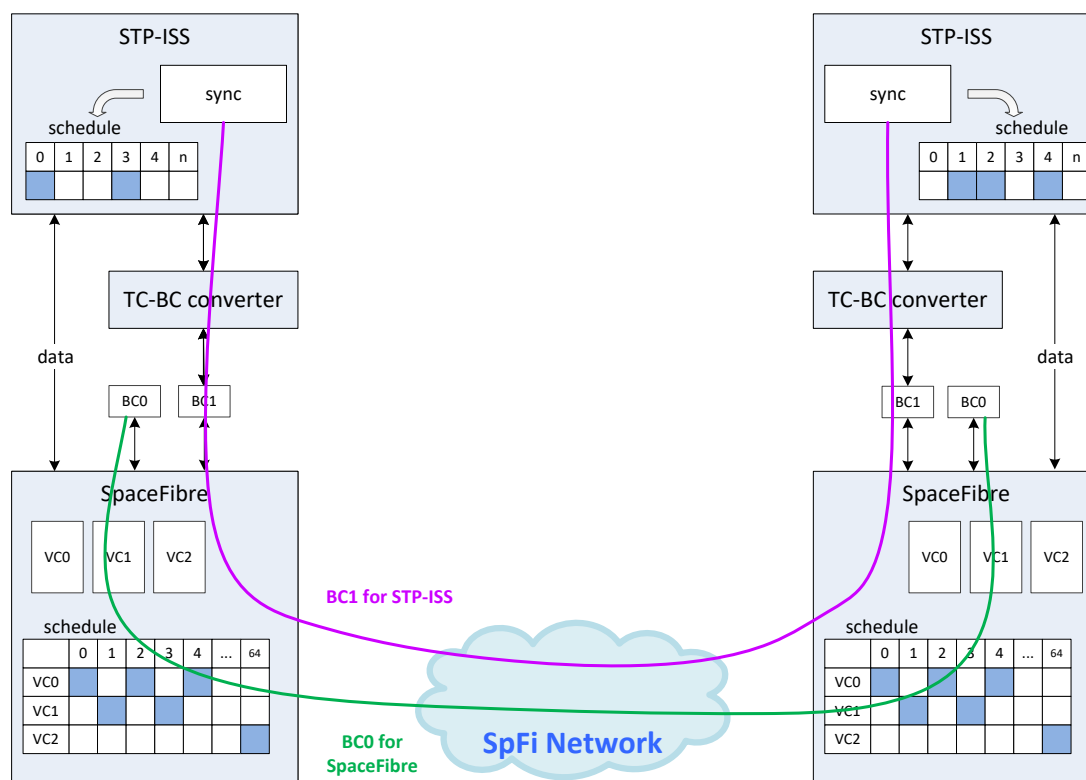


Рис. 4. Конвертер широковещательных сообщений для СТП-ИСС

отдельные широковещательные каналы для синхронизации на транспортных и канальных уровнях (рис. 4).

Дополнительной функцией СТП-ИСС, которую можно использовать для SpaceFibre, является синхронизация времени. Текущий механизм временной синхронизации SpaceFibre не указан, но протокол СТП-ИСС описывает механизм синхронизации для качества сервиса «планирование» (регулируемое количество временных интервалов в эпоху, синхронизация один раз в эпоху). В свою очередь, SpaceFibre обеспечивает планирование «точка-точка» для виртуальных каналов, и количество временных интервалов всегда равно 64: нет механизмов синхронизации, просто номер временного интервала для определения начала временного интервала (в будущем планируется что синхронизация должна быть предоставлена уровнем транзакций SpaceFibre).

Расписания СТП-ИСС и SpaceFibre являются асинхронными, однако для SpaceFibre можно использовать блок синхронизации СТП-ИСС. В этом случае для синхронизации СТП-ИСС для SpaceFibre будет использоваться другой широковещательный канал. Синхро-

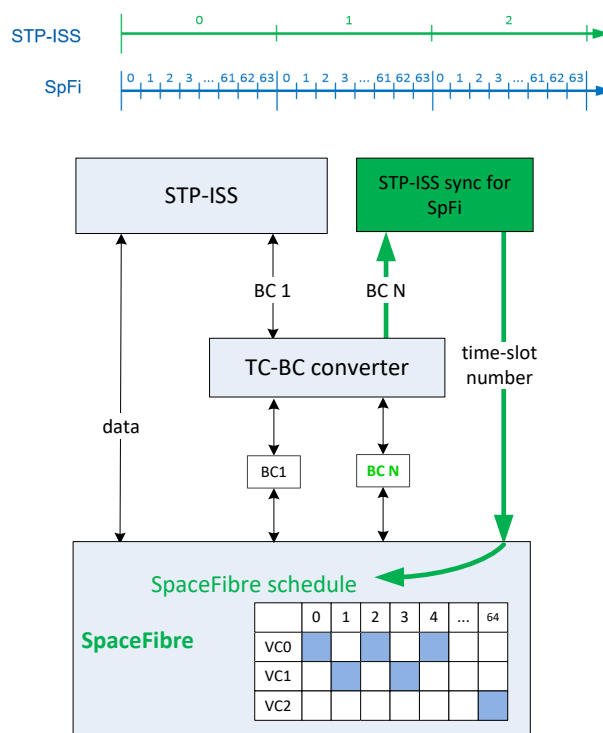


Рис. 5. Синхронизация СТП-ИСС и SpaceFibre

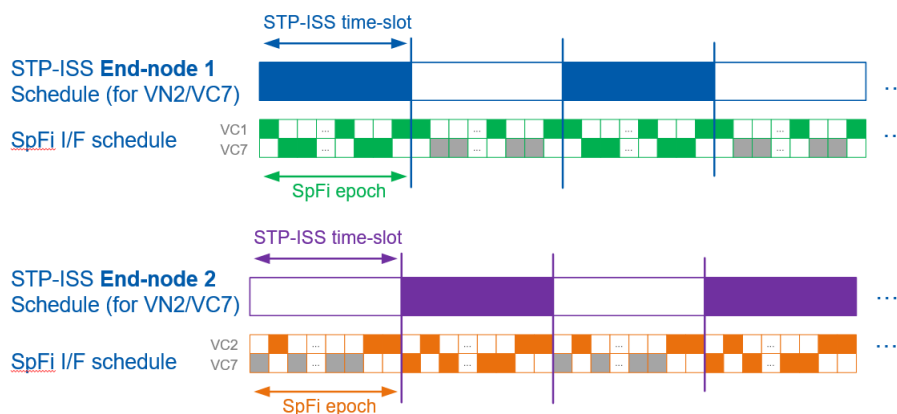


Рис. 6. Пример синхронизации тайм-слотов СТП-ИСС и SpaceFibre

низация будет производиться один раз в эпоху при приеме соответствующей трансляции. После синхронизации номер временного интервала будет выдан SpaceFibre (от 0 до 63). Таким образом, все устройства SpaceFibre в сети будут находиться в одном временном интервале (рис. 5).

Рассмотрим случай, когда несколько узлов являются инициаторами в одной виртуальной сети. В этом случае СТП-ИСС определяет расписание между объектами конечных узлов в сети, а SpaceFibre определяет расписание передачи данных между виртуальными каналами в интерфейсе канала SpaceFibre (рис. 6).

Если временной интервал СТП-ИСС равен одной или нескольким эпохам SpaceFibre, то можно использовать планирование СТП-ИСС для работы конечных узлов через одну и ту же виртуальную сеть.

Заключение

Таким образом, в данной статье было дано описание транспортного протокола СТП-ИСС, который был разработан для сетей SpaceWire. Мы описали основные внутренние механизмы протокола. Затем было рассмотрено применение СТП-ИСС для следующего поколения сетей SpaceWire – SpaceFibre, и показано, что СТП-ИСС может эффективно работать в сети SpaceFibre. Планирование СТП-ИСС может разрешать конфликты в виртуальных сетях SpaceFibre, такие как использование нескольких исходных узлов в одной VN, виртуализация сети SpaceWire в SpaceFibre VN и использование нескольких независимых потоков в одной VN. Кроме того, СТП-ИСС может предоставить решение для синхронизации времени в SpaceFibre.

Различные конфигурации SpaceFibre и СТП-ИСС могут предоставить пользователям множество различных сценариев и режимов работы, добавить дополнительную гибкость конфигурации.

Библиографический список

1. ESA (European Space Agency). Standard ECSS-E-50-12C rev.1, SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. Noordwijk: ESA Publications Division ESTEC, 2019. 123 p.
2. ESA. Standard ECSS-E-ST-50-52C, SpaceWire – Remote memory access protocol. Noordwijk: Publications Division ESTEC, 2010.
3. Standard ECSS-S-ST-50-53C, SpaceWire – CCSDS Packet Transfer Protocol. Noordwijk : ESTEC, 2010.
4. EADS Astrium GmbH, ASE2. SMCS-ASTD-PS-001 1.1, STUP SpaceWire Protocol. July 24, 2009.
5. Sandia National Laboratories. Joint Architecture System Reliable Data Delivery Protocol (JRDDP). Albuquerque, 2011.
6. Parkes S., Ferrer-Florit A. SpaceWire-D – Deterministic Control and Data Delivery Over SpaceWire Networks, Draft B. 2010.
7. Sheynin Y., Olenov V., Lavrovskaya I. et al. STP-ISS Transport Protocol Overview and Modeling // Proceedings of 16th Conference of Open Innovations Association FRUCT. Oulu, 2014. P. 185–191.
8. Analysis of the Transport Protocol Requirements for the SpaceWire On-board Networks of Spacecrafts / V. Olenov, I. Lavrovskaya, I. Korobkov, D. Dymov // Proceedings of 15th Seminar of Finnish-Russian University Cooperation in Telecommunications (FRUCT) Program; Saint-Petersburg: Saint-Petersburg University of Aerospace Instrumentation. 2014. P. 65–71.

9. *Sheynin Yu., Suvorova E., Yablokov E.* GigaSpaceWire – Gigabit Links for SpaceWire Networks // Proceedings of the 5th International SpaceWire Conference. Gothenburg, 2013. P. 28–34.

10. ECSS Standard ECSS-E-ST-50-11C, SpaceFibre, Issue 1. European Cooperation for Space Data Standardization. 2019.

11. *Ferrer Florit A., Gonzalez A., Parkes S.* SpaceFibre Interfaces and Architectures // 2019 IEEE Aerospace Conference, USA. 2019. P. 1–8.

12. *Tanenbaum A. S.* Computer Networks, Fifth Edition. Prentice Hall, 2011. 962 p.

13. *Korobkov I., Chumakova N.* Scheduling-Table's Design for STP-ISS Transport Protocol // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF – 2019). Saint Petersburg, 2019. P. 1–8.

14. *Olenev V., Podgornova E., Lavrovskaya I.* et al. Development of the transport layer scheduling mechanism for the onboard SpaceWire networks // Proceed-

ings of 16th Conference of Open Innovations Association FRUCT Program. Oulu, 2014. P. 164–170.

15. *Olenev V., Sheynin Y., Lavrovskaya I.* et al. Embedded Networks Design and Simulation // Tools and Technologies for the Development of Cyber-Physical Systems. Tampere: IGI Global, 2020. P. 77–118.

16. *Chumakova N., Olenev V.* Conformance Tester for STP-ISS Protocol Implementation Based on Formal Model // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF – 2018). SPb., 2018. P. 1–6.

17. *Шейнин Ю. Е., Рождественская К. Н., Евдокимов А.* и др. SpaceWire-Plug-and-Play для перспективных бортовых сетей АО «ИСС» // Современные проблемы радиоэлектроники. Красноярск, 2018. С. 196–200.

18. ARINC Specification 664P7, Aircraft Data Network. Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX™) Network. Aeronautical Radio, Inc. Published: 2005. 27 June. 145 p.

УДК 004.021

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-293-302

В. Л. Оленев*

кандидат технических наук, доцент

А. А. Карандашев*

инженер

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МЕТОДЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ БЕСТУПИКОВЫХ МАРШРУТОВ В БОРТОВЫХ СЕТЯХ SPACEWIRE

Обсуждается проблема выбора наилучшей комбинации беступиковых маршрутов алгоритма Up/Down routing в рамках программного обеспечения SANDS. Программное обеспечение разработано специально для конструирования и моделирования бортовых сетей SpaceWire. Второй компонент SANDS позволяет прокладывать беступиковые маршруты для информационных потоков и выбирать конфигурацию для представления пользователю. В документе сформулирована не только задача и проблемы данной области, но и производится обзор различных решений. Кроме того, представлен алгоритм позволяющий выбирать наилучшую комбинацию беступиковых маршрутов. Также обозначены альтернативные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: SpaceWire, методы, комбинация, беступиковый маршрут, алгоритмы.

V. L. Olenev*

PhD, Tech., Associate Professor

A. A. Karandashev*

Engineer

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

METHODS FOR SELECTING THE OPTIMAL CONFIGURATION OF DEADLOCK-FREE ROUTES IN ON-BOARD SPACEWIRE NETWORKS

This paper discusses the problem of choosing the best combination of deadlock-free routes of the Up/Down routing algorithm in the framework of the SANDS software. The software is designed specifically for design and simulation of SpaceWire on-board networks. The second component of SANDS allows you to set deadlock-free routes for information flows and select a configuration to present to the user. The document not only sets out the tasks and problems of this area, but also provides an overview of various solutions. In addition, an algorithm is presented that allows you to choose the best combination of deadlock-free routes. Alternative directions for further research are also indicated.

Keywords: SpaceWire, methods, combination, hapless route, algorithms.

В наше время проблема построения различных сетей стоит особенно остро. Эффективное планирование локальных сетей, сетей для крупных предприятий, сетей, обслуживающих большое количество заказов на крупных виртуальных рынках, бортовых сетей для авиации и космической отрасли востребовано как никогда.

Однако большинство направлений требует специфического узконаправленного программного обеспечения для принятия наиболее эффективных и надежных решений для каждой отдельно взятой области сетевых технологий. В частности, такой областью является проектирование бортовых сетей SpaceWire.

В статье рассмотрены программные аналоги, которые могли бы решать поставленные задачи. Среди аналогов программного обеспечения для проектирования бортовых сетей можно выделить такие программные продукты, как

ElectriCS Pro 7 Авиация, CAD5D, VISIO и др. Среди аналогов по построению маршрутов стоит выделить такое программное обеспечение как: NS-3, OMNET, AFDX и др.

Однако, в силу описанных далее причин, ни один из них не может полностью удовлетворять надежному и удобному проектированию бортовых сетей SpaceWire.

Поэтому программное обеспечение SANDS, обзор которого также приведен в данной статье, требует дальнейшего развития и решения текущих задач. В следующих разделах представлен не только краткий обзор самого программного обеспечения и алгоритма беступиковой маршрутизации Up/down routing, но и сформулированы задачи и трудности для выбора наилучшей комбинации маршрутов. Приведен обзор прошлых решений, дана оценка их с точки зрения сформулированных задач. Кроме того, представлен раз-

работанный алгоритм решения задачи о выборе наилучшей комбинации маршрутов. Обозначено альтернативное направление исследования.

Существующие решения

ElectriCS Pro Авиация предназначена для создания полной цифровой модели бортового электрооборудования летательных аппаратов, проектирования принципиальных схем и схем соединений электрических систем, схем монтажных коробок, для выпуска сопроводительной документации, технологической документации, публикации технических данных [1].

ElectriCS Pro принципиально не разрабатывался с ориентацией на поддержку тех или иных стандартов. Разработчики выбрали другое решение. ElectriCS Pro имеет теоретически разработанную цифровую модель электрооборудования, содержащую все возможные классы компонентов электрооборудования, документов и типов изделий [2].

Онлайн-программа CAD5D используется для проектирования локальных компьютерных сетей предприятия и административных зданий. С ее помощью можно разработать подробные поэтажные планы здания, разместить необходимые абонентские точки и основные узлы управления, а также рассчитать необходимые длины всех кабелей [3].

Программа больше подходит для визуализации и расчета строительных решений. Прокладка кабеля, расчет освещения, 3D-визуализация – основные направления, поддерживаемые данным программным обеспечением. Программа не заточена под модульное изменение под каждый конкретный проект и не может эффективно применяться для решений, связанных с бортовыми системами и в частности со стандартом SpaceWire.

Microsoft Visio – программа, с помощью которой появляется возможность для составления графиков, чертежей, диаграмм, блок-схем. Приложение помогает представить графическую информацию в простом и доступном виде [4].

Из-за широкого охвата областей применения и больших возможностей программы – программа Visio плохо специализируется для более узких областей применения. Не хватает конкретных инструментов и возможностей. Абстрактный функционал не предоставляет инструментов для детального моделирования бортовых систем. Нет возможности построения маршрутов и анализа стандартов. Из этого вытекает что программное обеспечение Visio не будет лучшим решением для работы со стандартом SpaceWire.

OMNet++ – расширяемая, модульная C++-библиотека моделирования на основе компонентов, предназначенная для создания сетевых симуляторов, разработчик – Андраш Варга (Andras Varga) [5].

В данном симуляторе имеется возможность для масштабирования, чтобы создавать крупные сетевые топологии. OMNet++ не может моделировать ОС прикладного уровня задержки времени выполнения. Задержки для нижних слоев, например, MAC и беспроводного канала, определены. Без соответствующих имитационных моделей и расширений, которые нужно скачивать дополнительно, симулятору не хватает протоколов и должного качества моделирования сетей, так как основная поддержка ориентирована главным образом в сторону IP сетей. Использование данного программного продукта также не является наилучшим решением при разработке бортовых сетей SpaceWire.

Другой программный инструмент представлен в [6]. Он позволяет проектировать виртуальные каналы в сети AFDX (Avionics Full-Duplex Switched Ethernet).

Однако виртуальные каналы используют много памяти. Каждый виртуальный канал должен иметь выделенный буфер в каждом коммутаторе. SpaceWire была разработана для использования как можно меньшего объема памяти. Это означает, что описанное выше программное обеспечение не подходит [7].

Симулятор NS-3 – это симулятор сети дискретных событий, предназначенный прежде всего для исследований и образовательных целей [7].

Данное программное обеспечение не подходит для бортовых сетей SpaceWire, поэтому необходимо иметь более специализированный инструмент.

Несмотря на огромный выбор средств по проектированию и моделированию компьютерных сетей, ни один из рассмотренных программных продуктов не может полностью удовлетворять требованиям для удобного и полного проектирования, моделирования и маршрутизации бортовых сетей SpaceWire. Конечно, можно использовать набор различного программного обеспечения с учетом недостатков и специфики каждого из них, однако потребность в удобном и цельном программном продукте налицо. В связи с этим рассмотрим разрабатываемый продукт – SANDS.

Обзор программного обеспечения SANDS

SANDS – это автоматизированная система проектирования и моделирования сетей

SpaceWire, которая поддерживает полный цикл разработки и моделирования бортовых сетей, который начнется с автоматизированной генерации топологии сети и закончится получением результатов моделирования работы, статистики и различных диаграмм. SANDS включает практически всю функциональность необходимую для прототипирования реальной бортовой сети.

SANDS состоит из четырех основных компонентов:

- 1) компонент для проектирования физической структуры сети и установки физических характеристик;

- 2) компонент для построения беступиковых маршрутов;

- 3) компонент для формирования таблиц планирования транспортных протоколов STP-ISS для передачи данных с планированием качества обслуживания [8];

- 4) компонент моделирования сети, который обрабатывает все данные, полученные от трех предыдущих компонентов и графического интерфейса пользователя [9].

Компонент 2 отвечает за построения беступиковых маршрутов в сети [10]. Это одна из важнейших задач при проектировании сетей. Он состоит из поиска последовательности коммутаторов между передатчиком и приемником и создания таблиц маршрутизации для этих коммутаторов. Технология SpaceWire обеспечивает возможность создания бортовых сетей с гибкой архитектурой и высокой пропускной способностью. Настройка таблиц маршрутизации в коммутаторах позволяет использовать статическую маршрутизацию для сети SpaceWire. Кроме того, компонент построения маршрутов дает возможность строить резервные маршруты.

В соответствии с проложенными маршрутами SANDS предоставляет таблицы маршрутизации для конфигурирования коммутаторов. Кроме того, этот компонент SANDS обеспечивает расчет задержки для наихудшего случая передачи данных и кодов управления SpaceWire.

Реализация алгоритма Up/Down routing

Up/Down routing – это алгоритм беступиковой маршрутизации для регулярных и нерегулярных топологий. SANDS использует алгоритм построения маршрутов для сетей SpaceWire, который отличается от классического алгоритма Up/Down routing.

Чтобы избежать тупиков, все еще позволяя всем связям использоваться, эта схема направления использует правило «up/down»: правильный маршрут должен сначала пересечь

нуль или более линков в направлении «вверх», а затем нуль или более линков в направлении «вниз». Таким образом канальные зависимости избегаются так как пакет не может пересечь линк в направлении «вверх» после пересечения линка в направлении «вниз».

Заданная пользователем в SANDS топология сети представляется в виде графа $G = (V, E)$, где V – множество узлов и коммутаторов в сети; E – множество каналов связи.

Ориентированный граф [11] топологии сети обозначим как $G^*(V, A)$. Для дуплексного канала используются две дуги противоположных направлений.

Для решения задачи беступиковой маршрутизации применяется метод, основанный на построении ациклического графа топологии сети. Построение графа начинается с построения дерева, в котором задается ориентация ребрам графа топологии сети. Дерево строится в глубину, начиная с корневой вершины.

Таблицы маршрутизации при этом создаются в соответствии с правилами Up/down маршрутизации: маршрут должен сначала пройти через нуль или более дуг в прямом направлении («вверх»), а затем нуль или более дуг в обратном направлении («вниз»). Таким образом канальные зависимости избегаются, так как пакет не может пересечь дугу в направлении «вверх» после пересечения дуги в направлении «вниз». Данный метод решения задачи беступиковой передачи данных учитывает червячную маршрутизацию, которая используется в стандарте SpaceWire.

Чтобы перейти к поиску маршрутов, необходимо из полученного ориентированного графа топологии построить каналозависимый граф (CDG). Каналозависимый граф отображает зависимость каналов, занимаемых пакетами при передаче данных в сети. Использование каналозависимого графа – переход от сложной логики Up/down маршрутизации к простому представлению использования каналов для передачи.

Каналозависимый граф содержит в себе вершины, представляющие физические каналы сети, и дуги, определяющие возможную последовательность использования этих каналов.

Для построения каналозависимого графа необходимо дополнить полученный ациклический граф топологии сети обратными дугами, чтобы учитывать возможность передавать данные в прямом и обратном направлении. Исходные дуги помечаются как основные. Таким образом получается дополненный граф с помеченными дугами. Далее для каждой дуги создаются вершины каналозависимого графа. Если

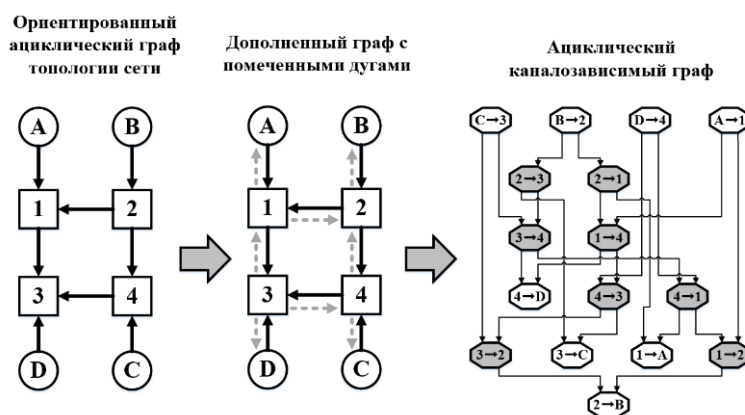


Рис. 1. Получение каналозависимого графа

в дополненном графе между помеченными дугами возможна передача по правилам Up/Down маршрутизации, значит дуга добавляется в каналозависимый граф между соответствующими вершинами. Получение каналозависимого графа представлено на рис. 1.

После построения каналозависимого графа, необходимо построить маршруты между заданной парой вершин. Для этого производится разметка вершин графа из которых можно достигнуть приемника из заданной пары вершин построения маршрута. Разметка производится обходом в ширину от приемника только по обратным дугам.

Как только каналозависимый граф размечен, производится поиск маршрутов между заданной парой вершин. Поиск происходит в глубину от вершины источника до вершины приемника. В качестве следующей вершины, записываемой в маршрут, выбирается та, которая помечена как достижимая до приемника. Если таких вершин несколько – выбирается такая вершина, которая имеет кратчайшее расстояние до приемника. Выход из рекурсии говорит о том, что построен очередной маршрут.

Всего будет искаться $k+1$ маршрутов, где k – число альтернативных маршрутов, заданное пользователем. Таким образом реализованный алгоритм находит необходимое количество беспутниковых маршрутов с кратчайшим расстоянием или близким к кратчайшему.

Для выбора конфигурации маршрутов использовалась функция, работающая с пользователем через специальный интерфейс. Начальная конфигурация маршрутов выбиралась случайным образом. Если пользователь хотел изменить маршрут для конкретного информационного потока – он выбирал среди доступных для интересующего информационного потока. По-

сле чего формировалась новая конфигурация маршрутов.

Необходимо автоматизировать процесс построения наиболее эффективной конфигурации маршрутов. Разработать алгоритм и реализовать его в программном обеспечении SANDS.

Особенности реализации и требования к алгоритму

Необходимо определиться с критериями, которые будут определять наилучшую комбинацию маршрутов. Возможными критериями могут быть:

- количество хопов при передаче данных по маршруту;
- время передачи данных по маршруту;
- общее время передачи данных во всей сети.

Выберем общее время передачи во всей сети как основополагающий критерий для определения наилучшей конфигурации.

Для реализации автоматизированного процесса выбора наилучшей комбинации маршрутов стоит рассмотреть все возможности. Первая и самая очевидная из них – реализовать полный перебор всех возможных комбинаций, посчитать для них общее время передачи и после чего сделать однозначный выбор. Однако размер сети при работе в SANDS не ограничен, как и количество информационных потоков. При проектировании сети может оказаться огромное число информационных потоков, для каждого из которых на выбор представлено не меньшее число маршрутов. Полный перебор в таком случае займет слишком много времени, что недопустимо для программного продукта SANDS. Пользователь должен получать эффективный ответ в разумные временные рамки.

Для рассмотрения остальных возможностей необходимо рассмотреть проблему, которая

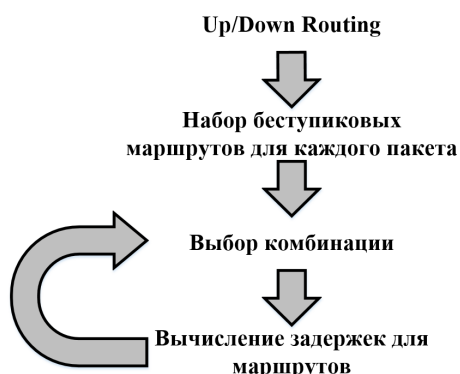


Рис. 2. Проблема «Петли»

встретилась при постановке задачи. Условно ее можно назвать проблемой «Петли», указанной на рис. 2.

После работы модифицированный алгоритм Up/down routing выдает набор беступиковых маршрутов для каждого потока данных. После чего необходимо выбрать комбинацию маршрутов. По выбранной комбинации, зная по какому маршруту и по каким каналам пойдет каждый информационный поток рассчитываться задержки для каждого выбранного маршрута из конфигурации.

Проблема заключается в том, что необходимо сделать выбор маршрутов, получить конфигурацию изначально основываясь на задержках передачи данных по каждому маршруту. Но посчитать эти задержки возможно только после рассмотрения конкретной конфигурации, поскольку, изменив хотя бы один маршрут – изменится ситуация во всей сети и нагрузка на каналы может распределиться совсем иначе.

Итак, мы подошли к проблеме, которую необходимо решить – проблеме «Петли». Теперь рассмотрим исследования, проведенные в прошлой статье и оценим их в рамках поставленной задачи с обозначенной проблемой.

Обзор методов решения и разработанный алгоритм

В исследовании [7] рассматривались такие методы выбора наилучшего маршрута, как:

- метод оценки маршрутов логико-вероятностным методом;
- комплексный метод выбора маршрута;
- алгоритм наилучшего пути BGP;
- метод, основанный на маршрутах, полученных из генетического алгоритма;
- метод рельефов [12].

Однако ни один из рассмотренных методов не подошел для реализации в SANDS в связи с причинами, указанными в таблице.

Сравнительная таблица

	Учет задержек	Задержка во всей сети	Учет беступиковости	Заданная модель располагает необходимыми данными	Поддержка протокольной передачи данных
Логико-вероятностный метод	+	-	-	-	-
Комплексный метод	-	-	-	-	-
BGP алгоритм	-	-	-	-	+
Анализ маршрутов, полученных генетическим алгоритмом	-	-	-	-	+
Метод рельефов	-	-	-	+	+

В связи с чем был предложен следующий метод выбора лучшего маршрута в бортовой сети SpaceWire.

Необходимо построить кратчайший маршрут с помощью метода рельефа. Количество хопов должно использоваться в качестве критерия для построения кратчайшего маршрута [7]. Возможны следующие варианты.

1. Построен один кратчайший маршрут.

Самый короткий маршрут следует сравнить со списком маршрутов от алгоритма Up/Down routing. Если построенный маршрут находится в списке, то он лучший. Пример показан на рис. 3, а. Кроме того, за счет сравнения со списком маршрутов из алгоритма Up/Down routing – можно убедиться, что построенный маршрут будет беступиковым.

Самый короткий маршрут следует сравнить со списком маршрутов от алгоритма Up/Down routing. Если построенный маршрут не указан, то самый короткий маршрут должен быть построен по методу рельефов, исключая уже рассмотренные маршруты. После получения нового маршрута перейти к пункту 1.

2. Построено два или более коротких маршрута.

Один маршрут находится в списке маршрутов от алгоритма Up/Down routing. Получившийся маршрут – лучший. Благодаря сопоставлению со списком маршрутов из алгоритма Up/Down routing можно убедиться в том, что построенный маршрут будет беступиковым.

Оба маршрута находятся в списке маршрутов от алгоритма Up/Down routing. Необходимо сравнить задержки полученных маршрутов

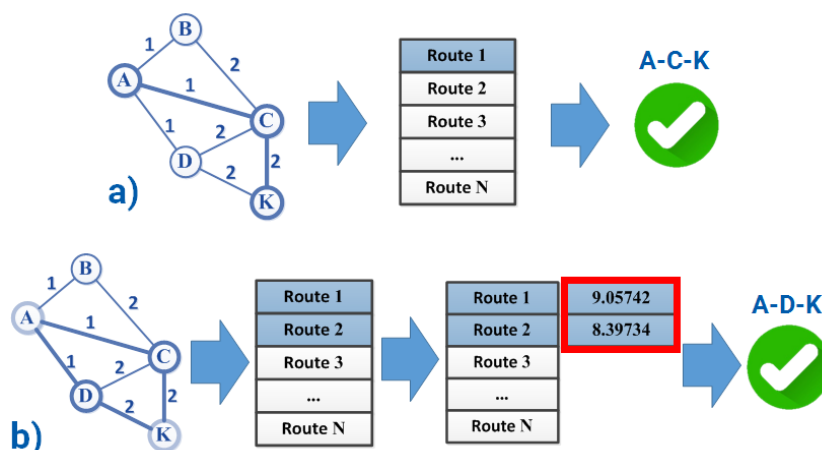


Рис. 3. Первая часть разработанного способа. Пояснения даны в тексте

в списке алгоритмов Up/Down routing. Маршрут с наименьшей задержкой будет лучшим. Пример показан на рис. 3, б. Таким образом, учитывается не только количество хопов и беступиковая маршрутизация, но и время передачи данных.

Ни один из маршрутов не находится в списке маршрутов от алгоритма Up/Down routing. Нужно строить кратчайший маршрут методом рельефа, исключая уже рассмотренные маршруты. После получения нового маршрута перейдите к пункту 1. Пример показан на рис. 4, а.

3. Все построенные маршруты не найдены в списке маршрутов от алгоритма Up/Down routing. В этом случае нужно сравнить маршруты из списка алгоритма маршрутизации Up/Down. Необходимо найти маршрут с наименьшей задержкой при передаче данных.

Найден один маршрут с наименьшей задержкой. Это лучший маршрут для передачи данных.

Найдено два или более маршрутов с одинаково низкой задержкой при передаче данных. Маршрут с наименьшим количеством хопов при передаче данных следует рассматривать как наилучший. Таким образом, учитываются параметры, такие как беступиковая маршрутизация, задержки и количество хопов. Пример показан на рис. 4, а.

Данный алгоритм не может быть решением, поскольку не отвечает всем требованиям, сформулированным ранее.

Он не учитывает общее время передачи данных в сети.

Не учитывается влияние данных на задержки при передаче по каналам.

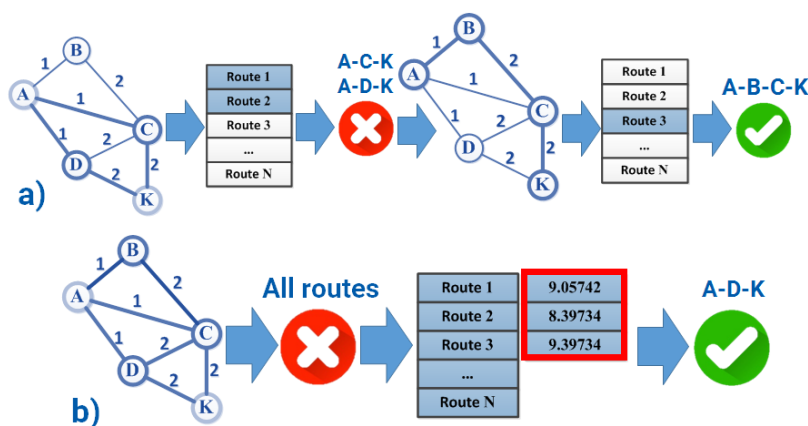


Рис. 4. Вторая часть разработанного способа. Пояснения даны в тексте

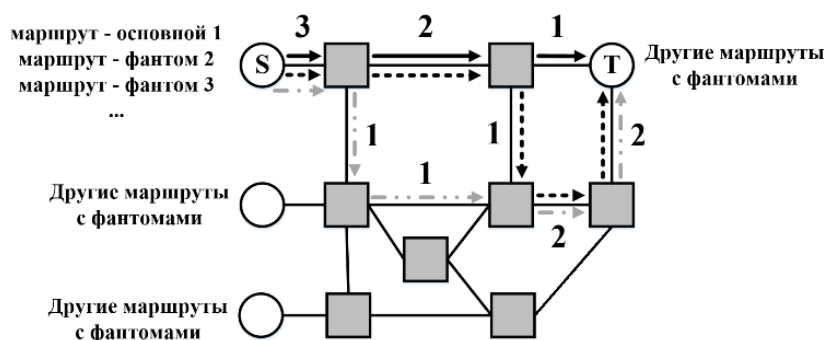


Рис. 5. Пример сети с фантомами для решения № 1

Основополагающим критерием является количество хопов что нецелесообразно, поскольку алгоритм беступиковой маршрутизации Up/down routing уже выдает набор кратчайших или близких к кратчайшим маршрутам.

В связи с рассмотренными недостатками появилась необходимость в разработке нового метода получения наилучшей комбинации маршрутов.

Новые исследования

Поскольку не подойдет ни полный перебор, ни решение предложенной в прошлой статье – стоит рассмотреть остальные варианты.

Решение № 1.

Решение № 1 было получено в ходе новых исследований. Рассмотрим его подробно. Для того чтобы понять, как грамотнее стоит подойти к решению данной задачи – выбора наилучшей комбинации маршрутов из заданного списка беступиковых маршрутов, стоит вспомнить обозначенные ранее проблемы. А именно – проблему «Петли». Без решения данной проблемы невозможно получить эффективного решения задачи. Напомним, что проблема заключалась в получении временных характеристик каждого канала для расчета задержек передачи маршрутов до получения конкретной конфигурации. Поскольку именно отталкиваясь от конкретной конфигурации представляется возможным просчитать задержки каждого канала и каждого маршрута соответственно и оценить общую задержку передачи данных в сети.

В качестве решения данной проблемы предлагается полностью нагрузить сеть всеми предложенными маршрутами от алгоритма беступиковой маршрутизации Up/down routing. Это означает что каждый маршрут, предложенный для каждого информационного потока будет приниматься во внимание. Условно можно ска-

зать что в сеть пойдет не только тот маршрут информационного потока, который считается основным, но и все его альтернативы. Условимся называть их фантомами.

Для примера необходимо рассмотреть ситуацию кода в сети есть N информационных потоков с возможными M маршрутами для каждого из них. Тогда для расчета сети будет рассматриваться не только первый маршрут первого потока, но и $M-1$ маршрутов-фантомов.

Аналогичным образом поступим и с остальными $N-1$ информационными потоками, заданными в сети. Теперь вся сеть наполнилась множеством реальных и фантомных маршрутов. Считается что данные будут передаваться сразу по всем маршрутам, наполняя и перегружая сеть. На всех каналах передачи будут ужасные задержки (также в качестве альтернативы вместо задержек можно рассматривать численную характеристику – количество проходящих через данный канал потоков). Пример сети с фантомами представлен на рис. 5.

Теперь проблема «Петли» решена. Получена некая характеристика, оценка для нашей сети. Оценка востребованности или загруженности каждого канала. У математической модели сети – графа, появились веса на его ребрах (каналах). Теперь можно производить оценку. Начнем первую итерацию.

Итерация 1.

Начинается анализ для первого информационного потока из заданного списка. Анализ производится на основе сравнения основного (первого) маршрута с маршрутами своих фантомов. В результате анализа выбирается маршрут, который затрагивает наименее востребованные каналы сети, наименее загруженные каналы. Однако формула определяющая выбор маршрута должна также учитывать и время передачи каждого маршрута по перегруженной сети. Маршрут не должен выбираться только на ос-

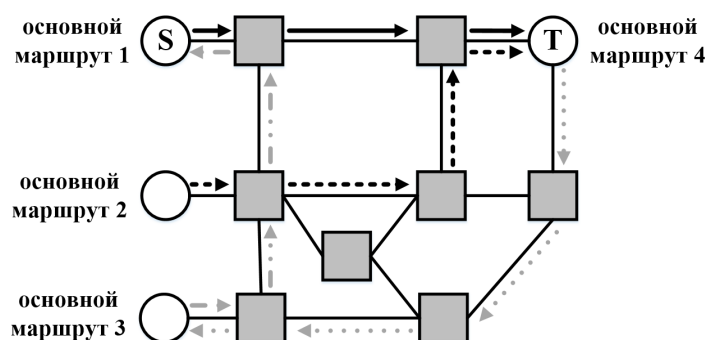


Рис. 6. Пример результата первой итерации для решения № 1

нове использования наименее занятых каналов. Если не будет учета наименьшего времени передачи в формуле выбора наилучшего маршрута для информационного потока – то может быть выбран пусть и наименее загруженный, но самый длинный и как следствие самый долгий маршрут, что не допустимо для данного информационного потока. Поэтому следует основываться не только на степени загруженности каналов сети, но и на информации о задержке при передаче по загруженной сети.

Как только был выбран маршрут для первого информационного потока – он становится основным. Все прочие $M-1$ фантомные маршруты данного информационного потока следует удалить из сети. После их удаления следует пересчитать всю сеть, чтобы иметь актуальную информацию о загрузке сети.

Теперь в сети основной маршрут первого информационного потока и еще $(N-1)(M-1)$ прочих маршрутов.

Переходим ко второму информационному потоку. Для него происходит анализ, как и для первого информационного потока. Выбирается основной маршрут на основе актуальной загрузки сети. Удаляются фантомы. Сеть пересчитывается. Так происходит до тех пор, пока не будут рассмотрены все N информационных потоков.

В конце первой итерации получена комбинация маршрутов для каждого информационного потока. Сеть больше не является перегруженной, а содержит всего по одному маршруту для каждого потока. Можно переходить ко второй итерации. Пример результата второй итерации представлен на рис. 6.

Итерация 2.

Нагрузка на сеть распределена. Фантомов в сети больше нет. Однако последний пакет на предыдущей итерации получил преимущество над всеми остальными, поскольку основывался на более актуальной информации о загруженности каналов. Для получения наилучшей ком-

бинации стоит предоставить повторный выбор всем информационным потокам по порядку, начиная с первого.

Каждый из N информационных потоков по очереди анализирует и сравнивает по тому же принципу свой основной маршрут с его альтернативными беступиковыми маршрутами алгоритма Up/down routing. Только теперь анализ происходит не на основе перегруженной сети, а на вполне обычной рабочей загрузке для сети. Возможно некоторые пакеты изменят свои маршруты, поскольку найдут более удачный маршрут как по загруженности каналов, так и по времени передачи в уже не перегруженной сети.

В конце второй итерации получены скорректированные решения для всех информационных потоков. Ситуация в сети опять изменилась, но стала более благоприятной. Можно переходить к итерации 3. Третья итерация проходит аналогично второй.

Пусть будет проведено P итераций. В результате, получая на каждой итерации значение общей задержки в сети мы записываем их в отдельную структуру данных. Проведя P итераций можно построить график, показанный на рис. 7.

В какой-то момент времени на k -й итерации общая задержка передачи данных в сети будет меняться с недостаточно большим шагом. Шаг необходимо задавать параметрически. Как только разница в выигрыше общей задержки на прошлой итерации по сравнению с текущей будет меньше заданного шага, так сразу следует прекратить перебор итераций.

Дальнейшие итерации не будут давать достаточно выигрыша, а будут колебаться лишь у некоторого значения. Фактически они будут шумом.

Предметом для дальнейших исследований в рассмотренном решении является определение формулы выбора маршрута для каждого

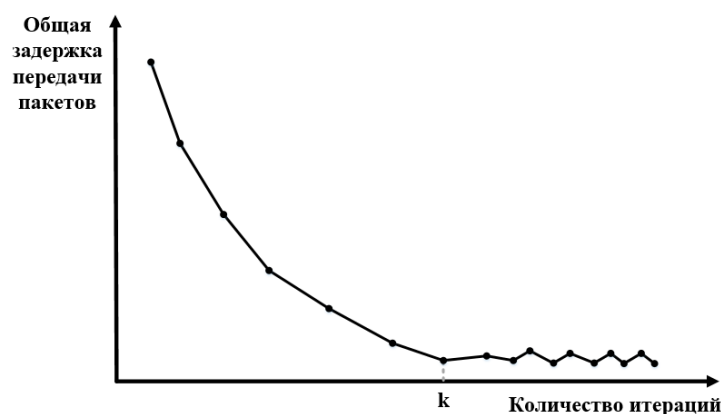


Рис. 7. Ожидаемый график для анализа эффективности разработанного метода

информационного потока. Кроме того, следует определить наиболее эффективный размер шага. Стоит реализовать разработанный алгоритм. Провести моделирование. Построить график и сравнить его с теоретическим.

Решение № 2.

Решение представляет собой по большей части наблюдения и обозначение альтернативного направления исследований.

Для решения проблемы «Петли» предлагается не разработка нового алгоритма по выбору наилучшего маршрута, а модификация существующего алгоритма беступиковой маршрутизации Up/down routing. Иллюстрация рассмотрена на рис. 8.

Таким образом можно просто не позволять появиться проблеме «Петли», выдавая на выходе алгоритма Up/down routing интересующую нас комбинацию.

Для достижения такого результата предлагается, основывая на теории графов производить оценку маршрутов, путем присвоения численных значений каждому ребру или вершине.

Возможно эффективным дополнением будет присвоения численного значения для каждого потока информации. Это может быть, как сумма баллов для платы за проход по некоторым «популярным» каналам передачи информации, так и компенсация за очередность выбора маршрута в сети.

Основываясь на различных теоремах теории графов, оценке графа сети с учетом особенностей алгоритма беступиковой маршрутизации Up/down routing – оставить только те маршруты между узлами, которые могут составлять наиболее эффективную комбинацию. Т.е. наименьшее время общей задержки в сети при передаче информации и минимальные задержки на каждом из маршрутов в полученной комбинации.

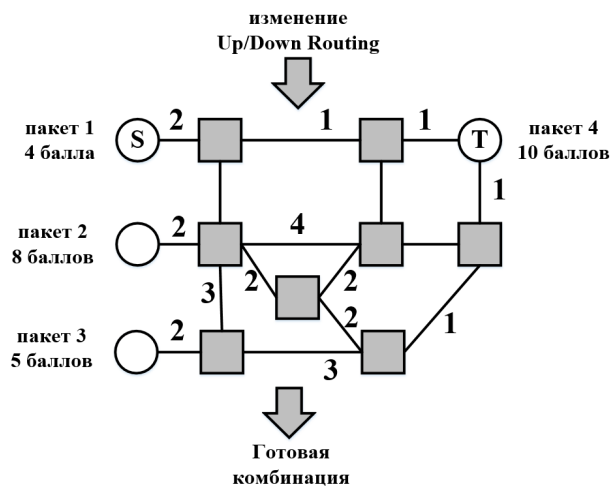


Рис. 8. Пример решения № 2

Дальнейшие исследования требуют модифицирование алгоритма беступиковой маршрутизации Up/down routing, разработка и оценка балльной системы для каждого информационного потока, анализ сети при помощи численной разметки графа сети. Возможна разработка нового типа графа для отбора лучшего маршрута среди всех проложенных для каждого информационного потока.

Заключение

В данной статье представлено введение в проблему моделирования бортовых сетей SpaceWire. Проведен подробный обзор альтернативных программных инструментов для построения, моделирования и работы с компьютерными сетями. Обозначены недостатки каждого рассмотренного программного решения.

Дан краткий обзор SANDS – системы автоматизированного проектирования и моделирования бортовых сетей SpaceWire. Программное обеспечение решает важные задачи, связанные не только с наглядным представлением конструируемой сети, но и учет ее физических характеристик, построения беступиковых маршрутов, формирование таблиц планирования и моделирования построенной сети.

Также в статье дан детальный обзор алгоритма беступиковой маршрутизации Up/down routing. Сформулирована задача и проблемы, связанные с выбором наилучшей конфигурации маршрутов. Обозначена проблема «Петли».

Рассмотрено решение из предыдущей статьи и дана оценка относительно сформулированных требований и проблем, встреченных при разработке. Прошрое решение оказалось нецелесообразным и неэффективным при текущих условиях. В результате чего были проведены исследования и разработан алгоритм, позволяющий получить наилучшую конфигурацию маршрутов из заданного списка. Также обозначена возможность альтернативного исследования и дальнейшей разработки для эффективного решения поставленной задачи по получении наилучшей комбинации беступиковых маршрутов, полученных от алгоритма Up/down routing.

Библиографический список

1. Кириллов В. Ю., Слипаченко А. А. Проектирование бортовой кабельной сети перспективного летательного аппарата / Труды МАИ: электрон. журн. Вып. 59.
2. Владимир Трушин. ElectriCS Pro – профессионалы для профессионалов. URL: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_44_electrics_pro.html (дата обращения: 25.10.2020).
3. Проектирование ЛВС с помощью программы CAD5D. URL: <http://cad5d.ru/proektir-lvs-cad5d> (дата обращения: 25.10.2020).
4. Обзор Microsoft Visio. URL: <https://softmonstr.ru/obzor-microsoft-visio/> (дата обращения: 20.10.2020).
5. Сопелев В. А. Методы повышения производительности сети при пиковых нагрузках / Сибир. федерал. ун-т. Красноярск, 2016.
6. Makin D. S., Maklin J. Внедрение, управление и поддержка сетевой инфраструктуры Microsoft® Windows Server™ 2003 // Рос. газета. 2006.
7. Оленев В. Л., Карандашев А. А., Алексеева К. И. Tools for analysis and tracking of deadlock-free routes in on-board SpaceWire networks // FRUCT 27th. 2019.
8. Design and Simulation of Onboard SpaceWire Networks / В. Л. Оленев, И. Ю. Лавровская, И. Л. Коробков, Ю. Е. Шейнин // FRUCT 24th. 2016.
9. DCNSimulator – программное средство для моделирования сетей SpaceWire / А. Эганян, Е. Суворова, И. Шейнин, А. Хэхулин // Слушания Международ. конф. SpaceWire. 2013. С. 216–221.
10. Dally W. J., Seitz C. L. Маршрутизация сообщений без взаимоблокировок в многопроцессорных межсоединительных сетях. 1988.
11. Робин Уилсон. Введение в теорию графов. 5-е изд. М.: Диалектика, 2019.
12. Норенков И. П., Трудоношин В. А. Телекоммуникационные технологии и сети. 2-е изд. 2000. 248 с.

УДК 004.021:004.415.2:004.622:004.623: 004.624:004.67:681.518.3:681.586

Е. Д. Оськина*

магистрант

В. Р. Луцив*

доктор технических наук

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОБИЛЬНОГО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

Разработаны и практически реализованы в экспериментальной установке методы автоматического определения физиологических параметров, позволяющих диагностировать состояние сердечно-сосудистой системы человека, – артериального давления, скорости распространения пульсовой волны и модуля упругости стенок кровеносных сосудов.

Ключевые слова: сердечно-сосудистые заболевания, артериальное давление, пульсовая волна, фотоплетизмограмма.

E. D. Oskina*

Postgraduate Student

V. R. Lutsiv*

Dr. Sc., Tech.

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

AUTOMATIC ANALYSIS OF HUMAN PHYSIOLOGICAL PARAMETERS FOR SOLVING THE TASKS OF MOBILE HEALTHCARE

The methods were developed and implemented in experimental hardware for automatic estimation of physiological parameters allowing to diagnose the state of human cardiovascular system, such as blood pressure, pulse wave propagation speed, and elastic modulus of blood vessel walls.

Keywords: Cardiovascular diseases, blood pressure, pulse wave, photoplethysmogram.

Введение

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) – одна из ведущих причин смертности в мире. Рост смертности от ССЗ не прекращается не смотря на значительные успехи в их диагностике и лечении. Одной из основных причин этого является отсутствие надлежащего мониторинга параметров сердечно-сосудистой системы (ССС) и оперативного реагирования на ее критические состояния. В частности, причиной повышения артериального давления (АД) могут быть как кратковременные факторы, связанные с физической активностью, эмоциями и стрессом, так и системные нарушения в состоянии ССС, единовременным измерением АД не выявляемые. Таким образом, для людей с гипертонической болезнью крайне важно не только постоянно контролировать свое АД для оперативного реагирования (резкое повышение АД может привести к летальному исходу), но и осуществлять регулярный мониторинг других важных параметров ССС, которые могут сигнализировать о

скрытых до определенного времени ее системных нарушениях. К сожалению, по сей день чаще всего применяются (особенно в домашних условиях) неинвазивные сфигмоманометры, все еще основанные на использовании манжеты, нарушающей регулярный кровоток. Они слишком громоздки и не могут непрерывно применяться в течение длительного периода времени. Кроме того, с их помощью измеряется только систолическое артериальное давление (СКД) и диастолическое артериальное давление (ДКД), и не может быть получена дополнительная важная информация о скрытых параметрах ССС.

В последние годы была показана перспективность измерения АД с помощью фотоплетизмограммы (ФПГ) [1], и, более того, этот метод позволяет оценивать и другие характеристики, важные для заблаговременного обнаружения неблагоприятных тенденций в состоянии ССС. Метод фотоплетизмографии основан на регистрации оптической плотности тканей человеческого тела. Исследуемый участок просвечивается светом определенного диапазона, кото-

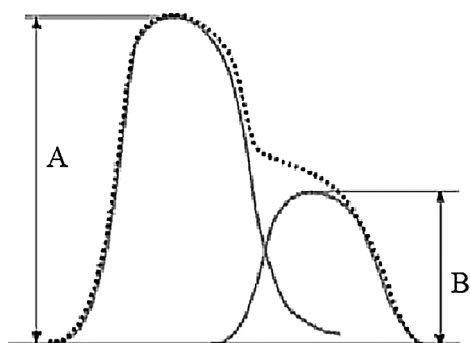


Рис. 1. Типичный контур пульсовой волны:
 А – амплитуда систолической пульсовой волны;
 В – амплитуда отраженной пульсовой волны

рый затем попадает на фотодатчик. Длина волны излучаемого света подобрана таким образом, чтобы он поглощался эритроцитами в артериальном русле. Поэтому интенсивность принятого датчиком света зависит от количества крови в исследуемой ткани. Регистрируемый сигнал называется фотоплетизмограммой и является репрезентацией пульсовой волны (ПВ). ПВ образуется в результате взаимодействия между левым желудочком сердца и сосудами большого круга кровообращения. Она состоит из двух пиков (рисунок 1): первый формируется благодаря систолической волне, второй соответствует волне, отраженной от тканей нижних конечностей и направляющейся обратно в аорту. Известно, что интенсивность отражения определяется тонусом артериол, поэтому анализ формы ПВ дает возможность оценить функциональное состояние и структурные изменения периферического сосудистого русла.

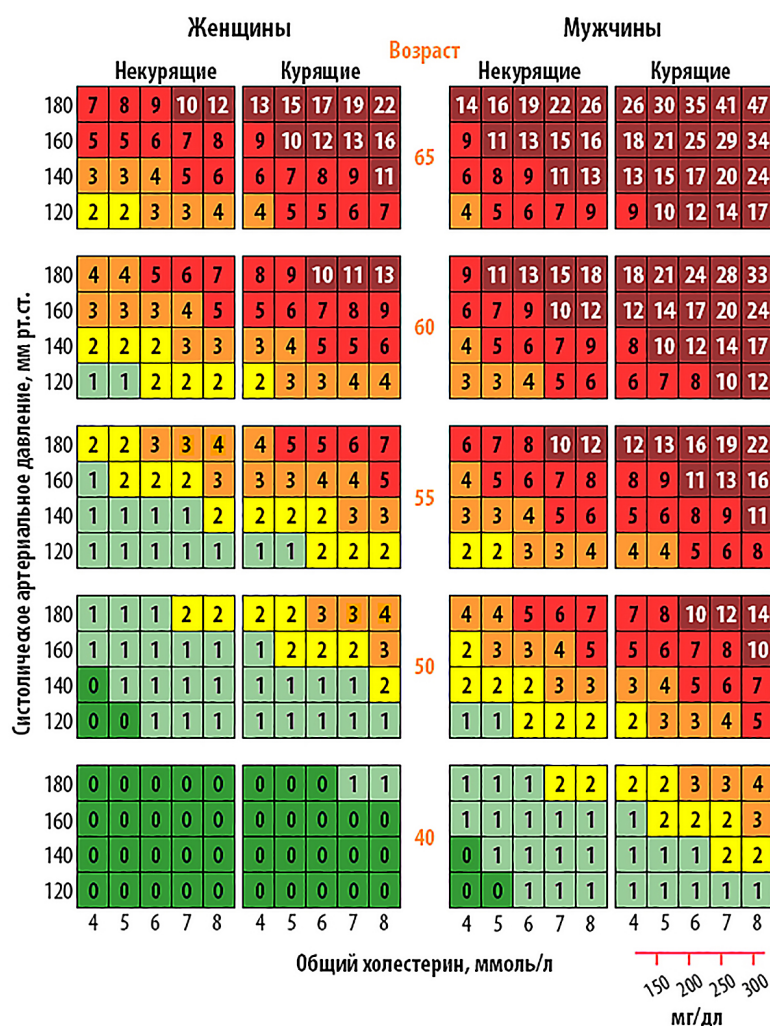


Рис. 2. Шкала SCORE для определения риска смерти от сердечно-сосудистого заболевания в ближайшие 10 лет

Целью настоящего исследования как раз и является автоматическое оценивание такого рода физиологических параметров ССС по информации, извлекаемой из ФПГ. Это позволит в дальнейшем создать методы для отслеживания изменений в ССС и предотвращения ССЗ в разы более оперативные имеющихся на сегодня.

Современные аналоги

В настоящее время для оценки суммарного риска ССЗ используются специальные таблицы. Наибольшую популярность получила модель SCORE (Systematic COronary Risk Evaluation), позволяющая оценить вероятность наступления фатального сердечно-сосудистого события в ближайшие 10 лет (в процентах), показанная на рис. 2. Для измерения используются всего три показателя: общий холестерин в крови, си-

столическое АД и возраст, также роль играет курящий это, или некурящий человек. Данная оценка используется только для людей старше 40 лет, для молодых людей есть шкала относительного риска (рис. 3) [2].

Есть несколько факторов, которые показывают устаревание данной модели.

1. Недостаточно рассмотрена статистика для людей моложе 40 лет, хотя, как показано на рис. 4, ССЗ являются преобладающей причиной смертности для людей в возрасте 20–24 лет.

2. Сложность исследований. Необходим анализ крови из-за чего оценка состояния пациента может происходить в течение нескольких дней.

3. Шкала SCORE не учитывает дополнительные факторы заболеваний, такие как ожирение, стрессы, физическая активность, сопутствующие заболевания.

Материал и методы исследования

Для измерений мы используем два синхронизированных фотоплетизмографа, на рис. 5 крупными белыми метками отмечены точки на артерии, с которых считывается сигнал. Использование синхронного измерения ПВ с двух точек одного сосуда поможет более полно оценить состояние ССС. В процессе исследований мы также снимали показатели с тонометра для контрольной сверки новых полученных результатов.

Для расчета кровяного давления P можно использовать время распространения ПВ:

$$P = -\frac{2}{a} \ln T + \frac{1}{a} \ln \left(\frac{L^2 \eta d}{h E_0} \right), \quad (1)$$



Рис. 3. Шкала определения относительного риска, используемая для молодых людей в возрасте моложе 40 лет

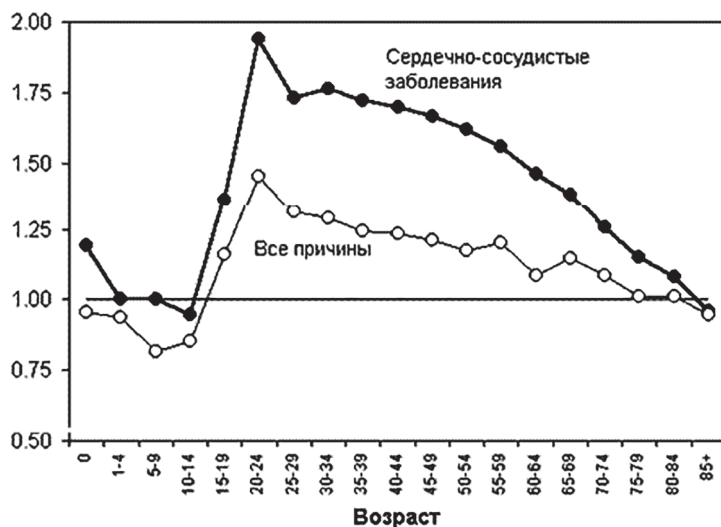


Рис. 4. Прирост возрастных коэффициентов смертности населения России от сердечно-сосудистых заболеваний и всех причин смерти

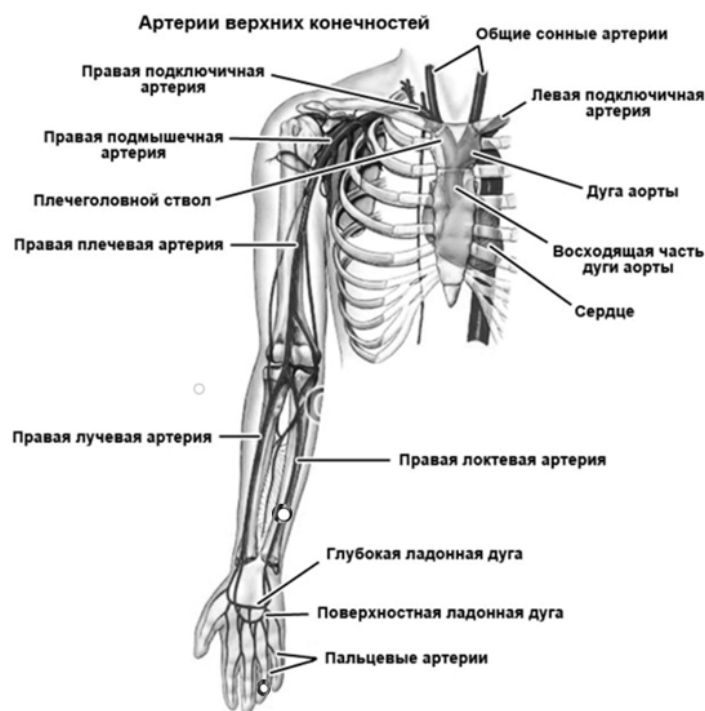


Рис. 5. Изображение артерий верхних конечностей

где E_0 – модуль упругости стенки сосуда; h – толщина стенки сосуда; d – внутренний диаметр сосуда; η – плотность крови; a – безразмерный коэффициент, T – время распространения ПВ между двумя точками измерения ФПГ. Формула показывает, что при сохранении постоянной эластичности сосуда изменение артериального давления пропорционально изменению времени распространения ПВ [3].

При расчете приняты следующие значения базовых параметров:

1) плотность крови η принята за константу, поскольку у здорового человека данный параметр изменяется незначительно: $\eta = 1,05 + 1,06$ г/см³;

2) безразмерный коэффициент a , учитывающий свойства сосудистой стенки, находится в пределах 0,016–0,018;

3) расстояние L между точками съема данных: в данном исследовании использовалось постоянное значение $L = 21$ см;

4) отношение толщины стенки сосуда к его диаметру можно также принять за константу, так как оно меняется незначительно для каждого человека: $h/d = 0,1$;

5) для получения модуля упругости стенок сосуда E_0 используем контрольные измерения АД и подставим их в формулу (1). Модуль вычисляется единожды для человека и после может быть использован как константа.

После вычисления модуля упругости стенок сосуда и АД, переходим к следующему этапу оценки полученной информации. Известны (измерены) время распространения ПВ T и рассто-

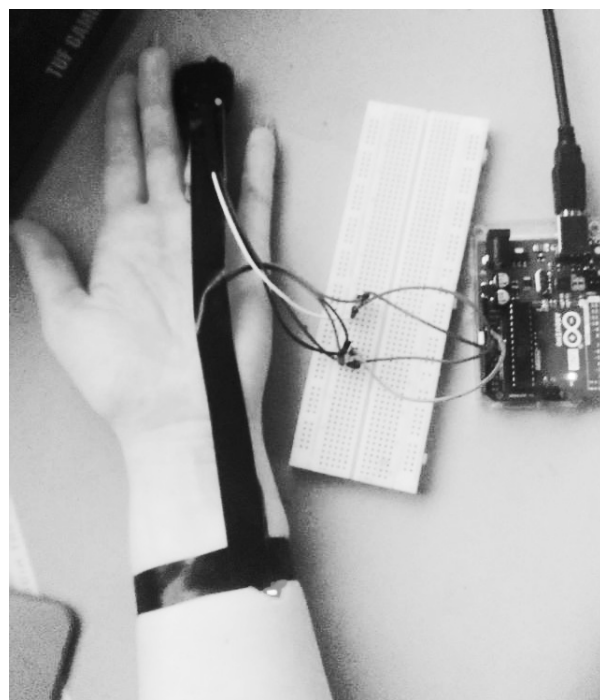


Рис. 6. Фотография используемого прибора

Таблица 1

Результаты расчетов

Пол	Возраст	Контрольное давление, мм.рт.ст.	Модуль упругости стенок сосуда	Время распространения ПВ, м/с	Расчитанное давление, мм.рт.ст.
Жен.	25	110/75	0,718	0,72	112/78
Жен.	25	116/88	0,762	0,664	120/87
Жен.	25	120/73	1,03	0,552	120/73
Жен.	25	124/66	0,579	0,712	129/68
Муж.	25	132/87	0,716	0,598	135/94

Таблица 2

Показатели состояния сосудов

Пол	Возраст	Контрольное давление, мм.рт.ст.	Скорость ПВ, сек	Индекс отражения, %	Индекс аугментации
Жен.	25	110/75	0,292	0,1	-0,43
Жен.	25	116/88	0,316	0,3	-1,32
Жен.	25	120/73	0,380	0,3	-1,385
Жен.	25	124/66	0,330	0,5	-2,053
Муж.	25	132/87	0,432	0,1	-0,502

яние L , которое она проходит. Теперь можно вычислить скорость S распространения ПВ:

$$S = L / T. \quad (2)$$

Риск развития сердечнососудистых осложнений возрастает линейно по мере увеличения скорости распространения ПВ, однако особенно сильно риск повышается при превышении скоростью уровня 12 м/с.

Следующий параметр – индекс аугментации I , который может быть вычислен с помощью записи ПВ на периферических артериях. I определяется как разница между вторым и первым пиками, выраженная в % по отношению к пульсовому артериальному давлению P в аорте:

$$I = (B - A) / P \cdot 100\%, \quad (3)$$

где A и B амплитуды соответственно прямой и отраженной составляющих пульсовой волны. У людей с эластичными сосудами индекс I имеет отрицательное значение, положительная динамика проявляется уменьшением этого показателя [4].

Последний параметр, который необходимо рассмотреть, это индекс отражения (R – reflection index). Это процентное отношение амплитуды отраженной ПВ к амплитуде систолической компоненты. Значение $R < 30\%$ соответствует нормальному тону мелким мышечных артерий [4].

Результаты исследований

На данный момент проведены исследования на молодых людях в возрасте 25 лет. По полученным данным вычислены модуль упругости стенок сосуда и скорость и время распространения ПВ (табл. 1). В табл. 2 приведены рассчитанные скорости распространения ПВ и индексы отражения и аугментации. На рис. 6 показана фотография используемого прибора.

В ходе выполнения экспериментов были встречены трудности при определении синхронных волн с двух точек съема фотоплетизмограмм, так как на измерения накладывались показания предыдущих сердцебиений. Для улучшения измерений брались их средние значения и калибровались входные данные.

Выполненные вычисления доказали, что данный способ расчета давления крови верен, и использованные методы измерения и расчетов можно использовать в последующей работе. Оцененные показатели состояния сосудов соответствуют возрасту испытуемых и отличаются от их известных значений в пределах их возрастной нормы.

Заключение

Была предложена методика оценки состояния важных физиологических параметров ССС человека, пригодная для реализации их регулярного мобильного мониторинга. Проведенные практические испытания показали работоспособность предложенной методики. Для повышения точности оценки состояния ССС необходимы дальнейшая доработка используемых алгоритмов выполнения измерений и проведение более широкого исследования: должна быть проведена проверка расчетов на базе расширенного набора категорий испытуемых. На следующих этапах разработки может быть также создана искусственная нейронная сеть, формирующая диагноз, что будет более понятно для обывателей и сделает этот метод диагностики подходящим и для внелабораторного использования. Также к такой автоматической системе мобильного диагностирования может быть добавлена система картотеки, где будут сохраняться результаты предыдущих обследований пациента для отслеживания динамики изменения его состояния.

При построении описанного выше измерительного комплекса и выполнении практиче-

ских экспериментов неоценимую помощь оказала сотрудница Института физиологии имени И. П. Павлова РАН госпожа Елизавета Карасева, за что мы ей очень благодарны.

Библиографический список

1. Xiaoman Xing and Mingshan Sun. Optical blood pressure estimation with photoplethysmography and FFT-based neural networks. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4986809/> (дата обращения: 12.12.2020).
2. European Society of Cardiology. SCORE Risk Charts. URL: <https://www.escardio.org/Education/>

Practice-Tools/CVD-prevention-toolbox/SCORE-Risk-Charts (дата обращения: 12.12.2020).

3. Анисимов А. А., Сергеев Т. В. Алгоритм оценки артериального давления по времени распространения пульсовой волны. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-otsenki-arterialnogo-davleniya-po-vremeni-rasprostraneniya-pulsovoy-volny/viewer> (дата обращения: 12.12.2020).

4. Дранкина О. М., Манджиева Б. А. Сосудистый возраст. Механизмы старения сосудистой стенки. Методы оценки сосудистого возраста. URL: <https://cardiovascular.elpub.ru/jour/article/viewFile/63/67> (дата обращения: 12.12.2020).

УДК 004.02

А. Ю. Петров*

магистрант

В. Л. Оленев*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ФОРМАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ

Рассмотрены различные формальные теории, при помощи которых можно проводить анализ сетей по различным критериям. Задачей статьи является анализ и сравнение существующих методик и выбор из них наиболее проработанной и удобной для применения. Анализ затронет существующие формальные методики с точки зрения главной идеи и принципов функционирования.

Ключевые слова: теория массового обслуживания, сети Петри, сетевое исчисление.

A. U. Petrov*

Postgraduate Student

V. L. Olenev*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

FORMAL METHODS OF RESEARCH THE CHARACTERISTICS OF NETWORK FUNCTIONING

The article discusses various formal theories that help to analyze networks according to various criteria. The purpose of the article is to analyze and compare existing methods and choose from them the most elaborate and convenient for application. The analysis will affect the existing formal methodologies for the research of the main idea and principles of functioning.

Keywords: Queuing theory, Petri Nets, Network calculus.

Крупномасштабные компьютерные сети являются неотъемлемой частью современного информационного общества. Это большие, многоуровневые распределенные системы, которые позволяют обслуживать большое количество пользователей с различными потребностями и требованиями к качеству обслуживания. Изменчивость основных требований к трафику и сложность взаимодействия сетей создают постоянные проблемы для поставщиков услуг, стремящихся привести доступные сетевые ресурсы в соответствие с потребностями. Значительные усилия сетевых инженеров направлены на разработку систем и методов измерения сетей.

Целью измерения сети является предоставление необходимых данных для описания состояния сети, ее производительности и необходимых действий по контролю. Последние варьируются от развертывания новой сетевой инфраструктуры для повышения производительности до динамической переадресации трафика для устранения дедлоков и узких мест, обнаружения и нейтрализации сетевых атак. Кроме

того, время выполнения таких действий варьируется от секунд для перенаправления, минут и часов для обнаружения атак до месяцев для обновления инфраструктуры. К другим задачам по управлению и проектированию сети, для которых полезны измерения сети, относятся проверка соглашений об уровне обслуживания, обнаружение неисправностей и определение качества предоставления услуг.

Целью работы является анализ существующих методик анализа сетей, а также выявление лучшей из них.

Теория массового обслуживания

Теория массового обслуживания (ТМО) – это математическое исследование очередей, которые возникают всякий раз, когда текущий спрос на услугу превышает текущую пропускную способность рабочего центра [1].

Первую значительную работу по организации очередей выполнил Агнер Крауп Эрланг из Датской телефонной компании в Копенгаге-

не в 1909 г. с целью определения оптимального количества телефонных линий для обработки заранее определенных частот вызовов.

Теория массового обслуживания исследует всю систему ожидания в очереди, включая такие элементы, как скорость поступления заявок, количество серверов, количество заявок, емкость зоны ожидания, среднее время завершения обслуживания и дисциплина при организации очереди [2].

Системами массового обслуживания (СМО) называются системы, в которые в случайные моменты времени поступают заявки на обслуживание. Поступившие заявки обслуживаются с помощью имеющихся в распоряжении системы каналов обслуживания [3].

Канал обслуживания – это устройство, обслуживающее заявку. СМО бывают одноканальные или многоканальные.

Процесс работы СМО представляет собой случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем. Состояние СМО меняется скачком в моменты: появления заявок, окончания обслуживания, выхода из очереди неудовлетворенных заявок.

Характеристики СМО

Модели массового обслуживания анализируют, как заявки (запросы, вызовы, клиенты) получают услугу. Система массового обслуживания содержит:

- процесс прибытия. Процесс прибытия – это то, как приходят заявки. Они могут стоять в очереди поодиночке или группами, и они могут приходить через определенные промежутки времени или случайным образом;

- поведение. Как ведут себя заявки в очереди? Некоторые, возможно, захотят дожидаться своего места в очереди; другие могут «потерять терпение» и уйти. Тем не менее другие могут решить вернуться в очередь позже, например, когда они приостановлены службой поддержки заявок и решат «перезвонить» в надежде получить более быстрое обслуживание;

- как обслуживаются заявки. Сюда входит продолжительность обслуживания заявки, количество серверов, доступных для оказания помощи заявкам, независимо от того, обслуживаются ли заявки по одному или пакетами, и порядок, в котором обслуживаются заявки, также называемый дисциплиной обслуживания;

- дисциплина обслуживания. Она относится к правилу, по которому выбирается следующая заявка. Хотя во многих сценариях розничной торговли используется правило FIFO («first

in – first out»), в других ситуациях могут потребоваться другие типы услуг. Например, заявки могут обслуживаться в порядке приоритета или в зависимости от количества информации, которые им необходимо обслужить. Иногда первым обслуживается последний пришедший клиент;

- зал ожидания. Количество заявок, которым разрешено ждать в очереди, может быть ограничено в зависимости от доступного места [4].

Формальная часть ТМО

В ТМО существует символика Кендалла – это сокращенная запись, которая определяет параметры базовой модели организации очередей. Обозначения Кендалла записываются в форме A/S/c/B/N/D, где каждая буква обозначает разные параметры.

Термин A описывает момент, когда заявки прибывают в очередь, в частности, время между прибытием или интервал времени. Математически этот параметр определяет распределение вероятностей, которому следует время между прибытиями. Одним из распространенных распределений вероятностей, используемых для члена A, является распределение Пуассона.

Термин S описывает, сколько времени требуется для обслуживания заявки после выхода из очереди. Математически этот параметр определяет распределение вероятности, которому следуют эти времена обслуживания. Распределение Пуассона также обычно используется для термина S.

Термин c определяет количество серверов в системе очередей. Модель предполагает, что все серверы в системе идентичны, поэтому все они могут быть описаны вышеупомянутым термином S.

Термин B указывает общее количество элементов, которые могут быть в системе, включает элементы, которые все еще находятся в очереди, и те, которые обслуживаются. Хотя многие системы в реальном мире имеют ограниченную емкость, модель легче проанализировать, если считать эту емкость бесконечной. Следовательно, если емкость системы достаточно велика, она обычно считается бесконечной.

Термин N определяет общее количество потенциальных заявок, т. е. количество заявок, которые могут когда-либо войти в систему очередей, которые можно считать конечными или бесконечными.

Термин D определяет дисциплину обслуживания системы очередей, такую как FIFO или LIFO [4].

В ТМО также существует Закон Литтла, который впервые был доказан математиком Джоном Литтлом, гласит, что среднее количество элементов в очереди можно рассчитать, умножив среднюю скорость поступления элементов в систему на среднее количество времени, которое они проводят в ней.

В математических обозначениях закон Литтла:

$$L = \lambda W,$$

где L – среднее число элементов; λ – средняя скорость поступления элементов в систему очередей; W – среднее количество времени, которое элементы проводят в системе очередей.

Закон Литтла предполагает, что система находится в «устойчивом состоянии» – математические переменные, характеризующие систему, не меняются со временем [4].

Хотя закон Литтла требует только трех входных данных, он является довольно общим и может применяться ко многим системам очередей, независимо от типов элементов в очереди или способа обработки элементов в очереди. Закон Литтла может быть полезен при анализе работы очереди в течение некоторого времени или для быстрой оценки текущей работы очереди.

Выводы по ТМО

Теория очередей может применяться к ситуациям, начиная от ожидания в очереди в продуктовом магазине и заканчивая ожиданием, пока компьютер выполнит задание. Она часто используется в программном обеспечении и бизнес-приложениях для определения наилучшего способа использования ограниченных ресурсов. Нотация Кендалла может использоваться для определения параметров системы массового обслуживания. Закон Литтла – это простое, но общее выражение, позволяющее быстро оценить среднее количество элементов в очереди.

Сети Петри

Сети Петри – это мощный инструмент исследования систем, который делает возможным моделирование системы путем математического представления ее в виде сети Петри [5].

Сети Петри были изобретены в 1962 г. доктором Карлом Адамом Петри.

Сети Петри являются мощным формализмом моделирования в компьютерных науках, системной инженерии и многих других дисциплинах. Они объединяют четко определенную математическую теорию с графическим представ-

лением динамического поведения систем. Теоретический аспект сетей Петри позволяет точно моделировать и анализировать поведение системы, а графический представление сетей Петри позволяет визуализировать изменения состояния моделируемой системы. Эта комбинация является главной причиной большого успеха сетей Петри. Сети Петри используются для моделирования различных видов динамических систем, управляемых событиями, таких как компьютерные сети, системы связи, производственные предприятия, системы командования и управления, вычислительные системы реального времени, логистические сети и рабочие процессы, при том это лишь несколько примеров их применения [6].

Сейчас сети Петри являются самым распространенным формальным методом, который описывает взаимодействие параллельных систем и их структуру. Способность сетей Петри демонстрировать динамику работы системы при помощи наглядного динамического представления является их выгодной особенностью. Благодаря математическим методам, при помощи которых можно проверять различные свойства моделируемого объекта и разрабатывать разного рода методы анализа, сети Петри нашли массовое применение в сфере моделирования.

Характеристика Сетей Петри

Сеть Петри – это особый вид двудольных ориентированных графов, заполненных тремя типами объектов. Эти объекты являются позициями, переходами и ориентированными дугами (рис. 1).

Ориентированные дуги соединяют позиции с переходами или переходы с позициями. В своей простейшей форме сеть Петри может быть представлена переходом вместе с позицией ввода и позицией вывода. Эта элементарная сеть может использоваться для представления различных аспектов моделируемых систем. Сеть Петри также использует понятие кратных дуг



Рис. 1. Отображение позиций и переходов в сети Петри

от одной вершины графа к другой. Дуги, связывающие одну и ту же позицию с одним и тем же переходом, являются кратными. Чтобы исследовать динамическое поведение моделируемой системы сети Петри с точки зрения ее состояний и изменений состояний, каждая позиция может потенциально содержать некоторое количество фишек (или маркеров). Фишки являются примитивной концепцией для сетей Петри в дополнение к позициям и переходам. Наличие или отсутствие фишки в каком-либо месте может указывать, например, является ли условие, связанное с этим состоянием, истинным или ложным. Маркировка в сети Петри – это присвоение фишек позициям сети Петри. Фишки могут находиться только в позициях сети Петри. Количество и расположение фишек может измениться во время исполнения сети Петри. Фишки используются для определения выполнения сети Петри [7].

Формальная часть Сетей Петри

Маркированная сеть Петри –

$$M = (P, T, I, O, \mu),$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – конечное множество позиций; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – конечное множество переходов, $P \cup T \neq \emptyset$ и $P \cap T = \emptyset$; $I: P \times T \rightarrow N$ – входная функция, которая определяет ориентированные дуги от позиций до переходов, где N – это множество неотрицательных целых чисел; $O: T \times P \rightarrow N$ – выходная функция, которая определяет ориентированные дуги от переходов к позициям; $\mu: P \rightarrow N$ – маркировка сети Петри [8].

Большая часть теоретических работ по сетям Петри основана на формальном определении структур сетей Петри. Тем не менее, графическое представление структуры сети Петри гораздо нагляднее для иллюстрации концепций теории сетей Петри. Граф сети Петри – это структура сети Петри как двудольный ориентированный мультиграф. В соответствии с определением сетей Петри у графа сетей Петри есть два типа узлов. Круг представляет собой позицию; полоса или поле представляет переход. Ориентированные дуги (стрелки) соединяют позиции и переходы. Обычно в графическом представлении параллельные дуги, соединяющие позицию (переход) с переходом (позицией), представлены одной ориентированной дугой, помеченной ее кратностью или весом k . Круг, содержащий точку, обозначает позицию, содержащую фишку [9].

На рис. 2 пример простой сети Петри.

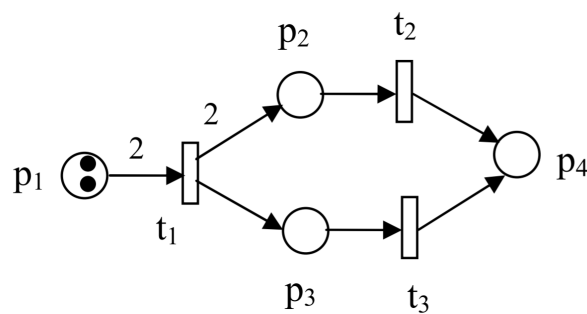


Рис. 2. Схема простой сети Петри

На рис. 2 показана простая сеть Петри. В этой сети Петри мы имеем:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\};$$

$$T = \{t_1, t_2, t_3\};$$

$$I(t_1, p_1) = 2, I(t_1, p_i) = 0 \text{ for } i = 2, 3, 4;$$

$$I(t_2, p_2) = 1, I(t_2, p_i) = 0 \text{ for } i = 1, 3, 4;$$

$$I(t_3, p_3) = 1, I(t_3, p_i) = 0 \text{ for } i = 1, 2, 4;$$

$$O(t_1, p_2) = 2, O(t_1, p_3) = 1, O(t_1, p_i) = 0 \text{ for } i = 1, 4;$$

$$O(t_2, p_4) = 1, O(t_2, p_i) = 0 \text{ for } i = 1, 2, 3;$$

$$O(t_3, p_4) = 1, O(t_3, p_i) = 0 \text{ for } i = 1, 2, 3;$$

$$\mu_0 = (2, 0, 0, 0)^T.$$

Выполнение сети Петри контролируется количеством и распределением маркеров в сети Петри. Изменяя распределение фишек в позициях, которые могут отражать, например, возникновение событий или выполнение операций, можно изучить динамическое поведение моделируемой системы. Сеть Петри выполняется путем запуска переходов [6].

В качестве математического инструмента сети Петри обладают рядом свойств. Эти свойства при интерпретации в контексте моделируемой системы позволяют разработчику системы идентифицировать наличие или отсутствие определенных функциональных свойств предметной области приложения проектируемой системы. Можно выделить два типа свойств: поведенческие и структурные. Поведенческие свойства – это те свойства, которые зависят от исходного состояния или маркировки сети Петри. Структурные свойства, с другой стороны, не зависят от начальной маркировки сети Петри, они зависят от топологии или структуры сети Петри.

Network calculus

Network calculus (Сетевое исчисление) – системная теория для анализа гарантий производительности в компьютерных сетях. Поскольку трафик проходит через сеть, он подвержен ограничениям, накладываемым системными компонентами, например, такими как [10]:

- пропускная способность линии связи;
- формирователи трафика;
- управление перегрузкой;
- фоновый трафик.

Эти ограничения могут быть выражены и проанализированы с помощью методов сетевого исчисления. Кривые зависимостей могут быть объединены с помощью свертки в алгебре min-plus. Сетевые вычисления могут также использоваться для выражения функций прибытия и отправления трафика, а также кривых обслуживания.

Min-plus-алгебра

Основное отличие сетевого исчисления от традиционной теории систем состоит в том, что сетевое исчисление основано на алгебре min-plus, тогда как традиционная теория систем основана на классической алгебре.

Среди общих черт между обеими теориями – использование оператора свертки. В классической теории систем свертка входного сигнала импульсной характеристикой системы дает выходной сигнал системы. Кроме того, импульсная характеристика конкатенации ряда систем задается сверткой импульсных характеристик всех систем. Точно так же в сетевом исчислении так называемая свертка min-plus используется для вычисления выходных данных формирователя трафика или для последовательного объединения узлов в один единственный узел. Тем не менее, обе теории имеют некоторые различия. Главный из них – ответ линейной системы на сумму двух входов.

В классической теории систем ответ к сумме двух входов – это сумма индивидуальных ответов на каждый сигнал. В алгебре min-plus сложение соответствует умножению в классической алгебре и поэтому является нелинейной операцией. В результате мало что известно об агрегации мультиплексированных потоков. С другой стороны, вычисление минимума соответствует сложению в классической алгебре. Следовательно, операция является линейной, и отклик минимум на два входа является минимумом ответов, взятых по отдельности. Еще одно отличие состоит в том, как обрабатываются нелинейные системы. В классической теории систем нелинейные системы линеаризуются вокруг своей рабочей точки, а входные сигналы ограничиваются вокруг этой рабочей точки. В сетевом исчислении нелинейная система заменяется линейной системой, которая является нижней границей для нелинейной системы [11].

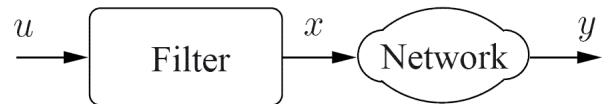


Рис. 3. Минимальная система для NC

Главная идея Network calculus

Сетевое исчисление (NC) можно определить, как набор правил и результатов, которые можно использовать для вычисления границ рабочих параметров сетей связи. Наиболее частые интересующие параметры: сквозная задержка; максимальная/минимальная скорость передачи и использование буфера.

NC основан на идее, что подробный анализ потоков трафика не требуется для определения производительности сети, если выполняются следующие условия:

- входные потоки имеют ограниченную пиковую скорость;
- предоставляется некоторая гарантия обслуживания.

Вышеуказанные условия определяют минимальную систему для NC (рис. 3):

- фильтр для ограничения (или формирования) входящего трафика;
- сеть, которая может предложить некоторую гарантию обслуживания.

Эти условия напрямую связаны с наиболее фундаментальными концепциями сетевого исчисления: кривыми регулирования и кривыми обслуживания [12].

Кривые регулирования

Кривые регулирования представляют фильтры, которые задерживают заданный поток, чтобы ограничить его резкое увеличение.

Рассмотрим функцию $x: R \rightarrow R^+ \cup \{+\infty\}$ такую, что $x(t)$ представляет совокупный объем данных, которые проходят через заданную точку сети в интервале $(0, t]$. Также учтем, что системы пусты в момент $t = 0$. Следовательно,

- $x(t)$ – неубывающая функция от t ;
- $x(t) = 0, \forall t < 0$.

Определим $F = \{x: x(t_1) \geq x(t_2), \text{ если } t_1 \geq t_2, \text{ и } x(t) = 0, \forall t < 0\}$. Таким образом, $x \in F$.

Для $x, \sigma \in F$ функция σ является кривой регулирования x , если $\forall s, t \in R, s \leq t$,

$$x(t) - x(s) \leq \sigma(t-s).$$

Учитывая дополнительно, что $x(0) = 0$, это уравнение также можно записать в виде $\forall t \in R^+$:

$$x(t) \leq \inf \{x(s) + \sigma(t-s), 0 \leq s \leq t\}.$$

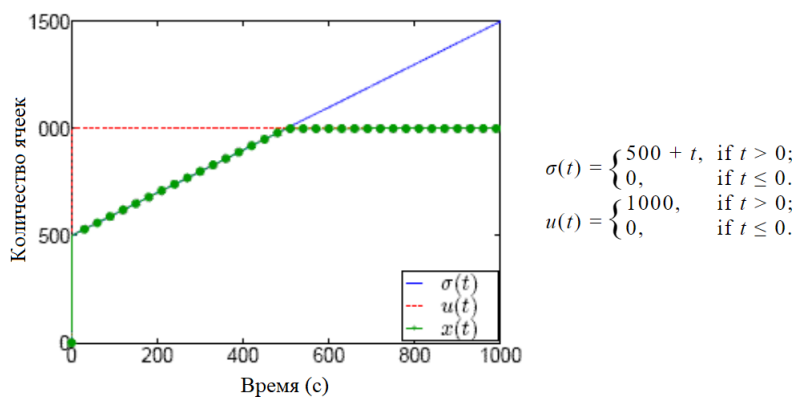


Рис. 4. Кривая регулирования

Наиболее распространенная кривая регулирования в литературе – это $\sigma(t) = b + r t, \forall t \geq 0$ (0 в противном случае). Token buckets, или «маркерные ведра», – это фильтры, которые удовлетворяют этому типу σ .

Рассмотрим ведро с маркерами с кривой регулирования σ , входным потоком u и выходным потоком x , как показано на рис. 2. Функция $u(t)$ представляет последовательность из 1000 ячеек, которая поступает на фильтр в момент $t=0$. Для удовлетворения кривой регулирования, token bucket задерживает половину ячеек, как показано на рис. 4.

Кривые обслуживания

Кривые обслуживания представляют собой объем данных, для которых предоставляется гарантийное обслуживание данной сети.

Для функций $x, y \in F$. Будем говорить, что $\beta \in F$ – это служебная кривая между x и y , если $\forall t \in R^+, \exists s \in R^+$ такие, что $s \leq t$ и $y(t) \geq x(s) + \beta(t-s)$.

В случае $x(0) = 0$ это уравнение также можно записать в виде, $\forall t \in R^+$:

$$y(t) \geq \inf \{x(s) + \beta(t-s)\},$$

$$0 \leq s \leq t.$$

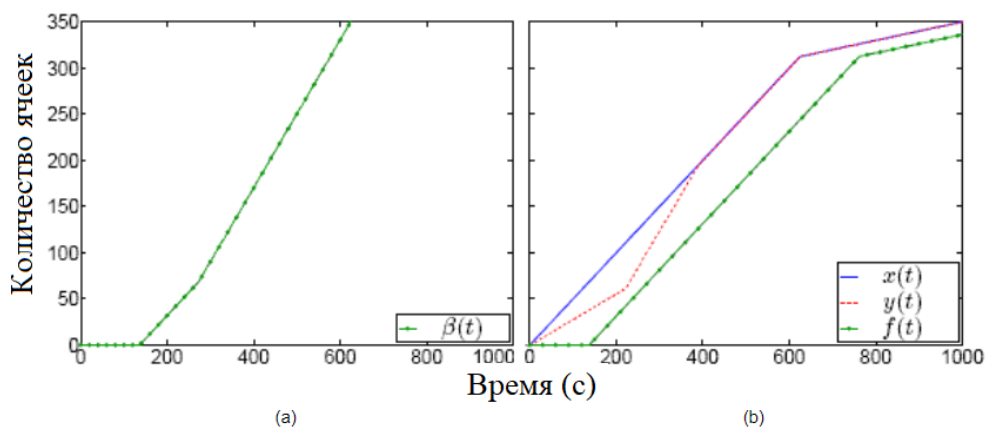
Определим отставание в системе как объем данных, все еще находящийся в пути (между точками ввода и вывода). Пусть s будет таким моментом, что

$$x(s) + \beta(t-s) = \inf \{x(s) + \beta(t-s)\},$$

$$0 \leq s \leq t.$$

Если в определении кривой обслуживания также требуется, чтобы отставание в момент s было равно нулю, т. е. $x(s) = y(s)$, то мы говорим, что β – это строгая кривая обслуживания между x и y . В этом случае $\forall t \in R^+, \exists s \in R^+$ такие, что $s \leq t$ и $y(t) - y(s) \geq \beta(t-s)$.

Строгие кривые обслуживания особенно важны для представления мультиплексирования потоков с разными приоритетами.

Рис. 5. Функции $x(t)$ и $\beta(t)$

Сравнение методик

	Теория массового обслуживания	Сети Петри	Сетевое исчисление
Год создания	1908	1962	1991
Сложность теории	Средняя	Средняя	Высокая
Основа методики	Классическая алгебра	Классическая алгебра	Алгебра min-plus
Для чего необходима?	Выбор структуры системы обслуживания и процесса обслуживания на основе изучения потоков требований на обслуживание	Моделирование и анализ поведение системы, визуализация изменения состояния моделируемой системы	Анализа гарантированной производительности телекоммуникационных пакетных сетей
Что можно анализировать?	Исследование системы поведения заявок, находящихся в очереди, для получения услуги	Исследование динамического поведения систем, управляемых различными событиями	Исследование сети с точки зрения пропускной способности линии связи, емкости каналов, формирователей трафика, контроля перегрузки, фонового трафика
Главное преимущество методики	Выгодный метод для создания принципов функционирования сети с внешними объектами при ограниченном наборе ресурсов	Наглядность принципов функционирования сети	Анализ сетей связи является главной задачей данной теории, что позволяет исследовать множество характеристик сети

Определим $[x]^+ = \max\{0, x\}$. Наиболее распространенной кривой обслуживания в литературе является кривая «задержки скорости», определяемая как $\forall t \in R$:

$$\beta(t) = R[t - T]^+.$$

Рассмотрим функции $x(t)$ и $\beta(t)$, как показано на рис. 5. Определим

$$f(t) = \inf \{x(s) + \beta(t-s)\},$$

$$0 \leq s \leq t$$

Если $y(t)$ является выходной функцией сети, которая предлагает кривую обслуживания $\beta(t)$ входящему потоку $x(t)$, то, согласно определению кривой обслуживания, $y(t)$ должен удовлетворять неравенству $\forall t: y(t) \geq f(t)$. На рис. 3 (b) показан пример функции $y(t)$, удовлетворяющей этому неравенству. Обратите внимание, что, как и ожидалось для причинных систем, $y(t)$ также удовлетворяет неравенству $y(t) \leq x(t)$, $\forall t$.

Параметры производительности: определение и границы

Для системы с входным потоком x и выходным потоком y определим:

бэклог в момент t – вертикальное отклонение между x и y , т. е.

$$x(t) - y(t);$$

виртуальная задержка в момент t – горизонтальное отклонение между x и y , т. е.

$$d(t) = \inf \{d \geq 0: x(t) \leq y(t+d)\}.$$

Из концепций кривых регулирования и обслуживания можно получить границы максимальной задержки и отставания между x и y , соответственно \bar{D} и \bar{W} , а также кривую регулирования σ_y для y . У нас есть

$$\bar{D} = \inf \{d \geq 0: \sigma(t) \leq \beta(t+d), \forall t\};$$

$$\bar{W} = \sup_{s \geq 0} \{\sigma(s) - \beta(s)\};$$

$$\sigma_y(t) = \sup_{s \geq 0} \{\sigma(t+s) - \beta(s)\}.$$

Заключение

Исходя из сравнения, можно сказать, что универсального подхода для полного анализа сетей пока нет. Каждая методика предлагает свою область исследования поведения сетей и свою реализацию анализа этой области. СМО лучше применять при необходимости выбора структуры системы обслуживания, а также на выборе самого процесса обслуживания, зависящего от предоставляемых процессу требований. При помощи Сетей Петри можно проверять различные свойства моделируемого динамического объекта и разрабатывать разного рода методы его анализа. Network Calculus же была бы полезна тем, кто хотел получить численные характеристики линий связи, перегрузок, передачи трафика. Применение НС позволит доказа-

тельно определить такие характеристики сети, как скорость, емкость канала, задержки и отставания передачи, что является одним из основных требований для современных бортовых космических и авиационных систем.

Библиографический список

1. *Swamidass P. M.* Encyclopedia of Production and Manufacturing Management. Springer, Boston, MA. 2000. 979 p.
2. *Ивченко Г. И., Каштанов В. А., Коваленко И. Н.* Теория массового обслуживания: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1982. 256 с.
3. *Beasley J. E.* Queuing Theory // Operational Research Notes. 2002. № 13. P. 1–5.
4. *Sharma J. K.* Operations Research: Theory and Application. Macmillan Ltd., India. 2007. 309 p.
5. *Оленев В. Л.* Моделирование систем: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2015. 95 с.
6. *Jiacun W.* Petri Nets for Dynamic Event-Driven System Modeling // Department of Software Engineering. Monmouth University, West Long Branch, NJ. 2007. 17 p.
7. *Latorre-Biel J.-I., Jiménez-Macías E.* Petri Net Models Optimized for Simulation // Simulation Modelling Practice and Theory, IntechOpen. 2018. 17 p.
8. *Celko J.* Trees and Hierarchies in SQL for Smarties. San Francisco: Elsevier, 2012. 296 p.
9. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1981. 264 с.
10. *Le Boudec J.-Y., Thiran P.* Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Springer // LNCS. 2001. 240 p.
11. *Ahuja K., Magnanti L., Orlin B.* Network flows: Theory, algorithms, and applications Prentice-Hall. 1993. 863 p.
12. *Cruz R. L.* A calculus for network delay // IEEE Transaction on Information Theory. 1991. Vol. 37, № 1. P. 114–131.

УДК 004.942

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-317-320

К. Н. Рождественская*

инженер

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕРВИСОВ В ПРОТОКОЛЕ PLUG-AND-PLAY ДЛЯ СЕТЕЙ SPACEWIRE

Описано поведение менеджера Plug-and-Play во времени при различных начальных условиях и внешних воздействиях. Рассматривается математическая модель, основанная на теории линейных динамических систем.

Ключевые слова: SpaceWire, линейная динамическая система, Plug-and-Play, математическая модель.

K. N. Rozhdestvenskaya*

Engineer

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE PLUG-AND-PLAY SERVICES IN ON-BOARD SPACEWIRE NETWORKS

This paper discusses the dynamical behavior Plug-and-Play manager during time with different initial condition and external influence. A mathematical model based on linear dynamic system theory is described in the paper.

Keywords: SpaceWire, linear dynamic system theory, Plug-and-Play route, mathematical model.

Данная статья является продолжением исследований, представленным в работах [1–5]. В работах [2–4] представлен временной анализ поведения менеджера Plug-and-Play, представленному в виде конечного автомата. В работе [5] представлена математическая модель, построенная на теории линейной динамической системы, которая описывает работу при приеме и обработке пакетов из сети.

Менеджер PnP выполняет основные сервисы по настройке и мониторингу сети [1, 4]: администрирование, мониторинг, реконфигурирование и синхронизация. В статье взаимодействие сервисов в менеджере Plug-and-Play (PnP) представлено в виде линейной динамической системы (рис. 1) с целью изучения динамических характеристик.

Линейная динамическая система представлена четырьмя состояниями:

- C_1 – выполнение администрирования;
- C_2 – выполнение мониторинга;
- C_3 – выполнение реконфигурирования;
- C_4 – выполнение синхронизации.

Между состояниями, на переходах, указаны коэффициенты, представляющие доли данных, которые переходят от состояния к состоянию:

a_1 – доля данных, которая передается для выполнения реконфигурирования с администрирования;

a_2 – доля данных, которая передается для выполнения мониторинга;

a_3 – доля данных, которая передается на администрирование, но только при вызове реконфигурирования с администрирования;

a_4 – доля данных, которая передается для выполнения реконфигурирования с мониторинга;

a_5 – доля данных, которая передается для выполнения синхронизации с мониторинга;

a_6 – доля данных, которая передается для выполнения мониторинга от реконфигурирования;

a_7 – доля данных, которая передается для выполнения мониторинга с синхронизации;

a_8 – доля данных, которая передается для выполнения синхронизации с реконфигурирования;

a_9 – доля данных, которая передается для выполнения реконфигурирования с синхронизации;

a_{10} – доля данных, которая выдается в систему.

Переменная u – это управление представленной системой, которое поступает на состояние C_1 . Переменная y отражает выход системы, который указан в состоянии C_2 . Вектор состояний x – это относительная загрузка каждого из четырех состояний. Он может принимать значе-

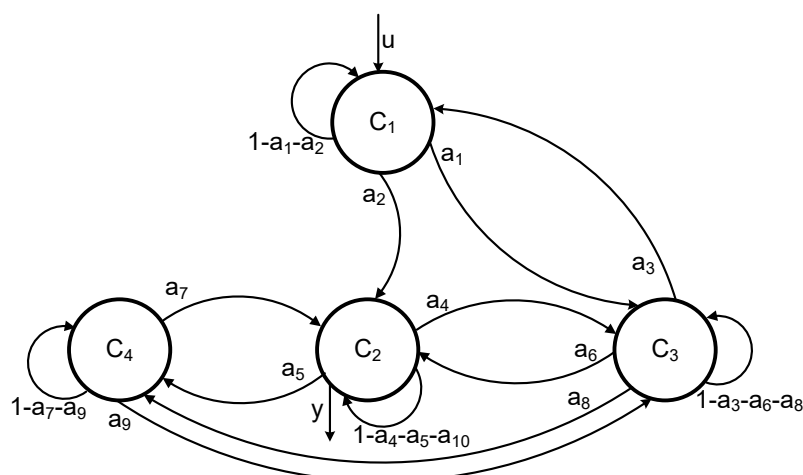


Рис. 1. Линейная динамическая система, отражающая взаимодействие сервисов менеджера PnP

ния от 0 до 1. Например, если $x_i = 1$, то загрузка состояния C_i максимальная. Тогда, основываясь на линейной динамической системе и описанных параметрах, можно определить матрицы коэффициентов, входов и выходов:

$$A = \begin{bmatrix} 1-a_1-a_2 & 0 & a_3 & 0 \\ a_2 & \begin{pmatrix} 1-a_4- \\ -a_5-a_{10} \end{pmatrix} & a_6 & a_7 \\ a_1 & a_4 & \begin{pmatrix} 1-a_3- \\ -a_6-a_8 \end{pmatrix} & a_9 \\ 0 & a_5 & a_8 & 1-a_7-a_9 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0].$$

Матрица входов имеет указанный вид, так как поставка данных происходит в состояние C_1 . Обновление служебных структур и повторный опрос бортовой сети происходит именно в сервисе мониторинга, который находится в состоянии C_2 .

Исследование динамических характеристик в работе представлено для одной ситуации, так как данное исследование может быть сделано для расчета любых входных данных, для любой системы, в которую должен быть встроен менеджер PnP, работа по данному направлению будет представлена в следующих публикациях. Представляемая ситуация – относительно большая

часть данных перемещается между администрированием, мониторингом, синхронизацией и реконфигурированием, причем реконфигурирование и синхронизация вызываются с мониторинга.

В случае, когда происходит стандартный обмен данными, первая ситуация, определим коэффициенты следующим образом: $a_1 = 0,1$, $a_2 = 0,9$, $a_3 = 0,1$, $a_4 = 0,5$, $a_5 = 0,2$, $a_6 = 0,9$, $a_7 = 0,3$, $a_8 = 0,1$, $a_9 = 0,1$, $a_{10} = 0,6$. Матрица коэффициентов в этом случае приобретает вид:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0,9 & -0,3 & 0,9 & 0,3 \\ 0,1 & 0,5 & -0,1 & 0,1 \\ 0 & 0,2 & 0,1 & 0,6 \end{bmatrix}.$$

Первая динамическая характеристика – устойчивость. Она определяет стабильность работы не только в нормальном режиме, но и в случае отклонения от него [5]. Для определения этой характеристики необходимо найти спектральный радиус матрицы коэффициентов. Искомая величина, спектральный радиус, $R(A)$ равен 0,88. Это означает, что условие устойчивости выполнено, то есть линейная динамическая система, отражающая взаимодействие сервисов менеджера PnP устойчива.

Управляемость, вторая динамическая характеристика, позволяет можно ли перевести линейную динамическую систему из начального состояния в любое конечное за определенное количество шагов. Для этого необходимо найти матрицу управляемости Γ и определить ее ранг. Матрица управляемости G для рассматриваемой ситуации:

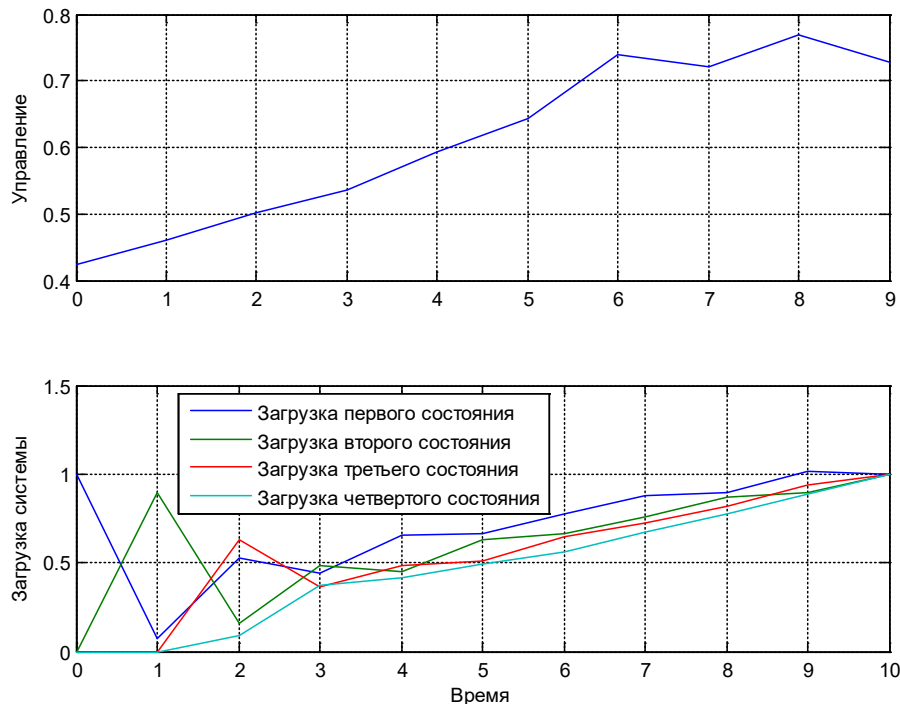


Рис. 2. Управление и загрузка линейной динамической системы, отражающей взаимодействие сервисов менеджера PnP

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0,01 & 0,04 \\ 0 & 0,9 & -0,18 & 0,52 \\ 0 & 0,1 & 0,44 & -0,11 \\ 0 & 0 & 0,19 & 0,12 \end{bmatrix}.$$

Ранг такой матрицы управляемости равен 4, как и размерность матрицы коэффициентов, значит, линейная динамическая система является управляемой. Что приводит к выводу о том, что можно рассчитать поставку данных в систему, которая приведет к требуемым нагрузкам по всем состояниям [5]. Произведены расчеты и построен график управления и загрузки состояний с помощью программы-сценария MatLab (рис. 2).

Рисунок демонстрирует управление $u(t)$ при заданной нагрузке $x(t) = [1; 1; 1; 1]$. Как видно из графиков система плавно загружается во времени, нет простоя и нет перегрузки в состояниях на протяжении всего времени моделирования.

Третья характеристика – наблюдаемость. Для проверки линейной динамической системы необходимо определить ранг матрицы наблюдаемости: $\text{rank}([C^T, A^T C^T, (A^T)^2 C^T, (A^T)^3 C^T]) = 4$. Полученное значение соответствует рангу ма-

трицы коэффициентов, это означает, что по изменениям данных на выходе линейной динамической системы, можно восстановить ее состояние в начальный момент времени [5]. На рисунке загрузки системы видно, что в момент времени 0 линейная динамическая система находилась в состоянии C_1 . А по завершении моделирования все состояния системы находятся в полной нагрузке.

Для представленной стандартной ситуации, большая часть данных перемещается между администрированием, мониторингом, синхронизацией и реконфигурированием, причем реконфигурирование и синхронизация вызываются с мониторинга, видно, что сервисы являются управляемыми, возможны расчеты нагрузки всех четырех состояний и поставки данных для линейной динамической системы с целью поиска ее прочих аппаратно-программных характеристик (в случае проектирования конкретной системы управления для конкретной миссии). Написана программа-сценарий MatLab для выполнения моделирования и построения графиков управления и загрузки состояний во времени. Результаты проведенного моделирования подтвердили полученные расчеты.

Исследование количественного анализа будет расширено и представлено отдельной публикацией.

Библиографический список

1. Шейнин Ю. Е., Рождественская К. Н., Евдокимов А. С. и др. SpaceWire-Plug-and-Play для перспективных бортовых сетей КА АО «ИСС» // Современные проблемы радиоэлектроники. 2018. С. 196–200.
2. Рождественская К. Н. Анализ поведения менеджера Plug-and-Play для сетей SpaceWire // Научная сессия ГУАП. Ч. I: Техн. науки: сб. докл. СПб.: ГУАП, 2018. С. 225–232.
3. Рождественская К. Н. Временной анализ системы управления в сети обработки данных // Информационно-управляющие системы. 2019. № 1. С. 32–39. Doi: 10.31799/1684-8853-2019-1-32-39.
4. Sheynin Y. E., Suvorova E. A., Rozhdestvenskaya K. N. Management in perspective distributed onboard computing systems based on SpaceWire standard, 2019 // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF – 2019). 2019.
5. Рождественская К. Н. Количественный анализ программы для управления бортовой вычислительной сетью // Информационно-управляющие системы. 2020. № 4.(107). С. 42–49. Doi: 10.31799/1684-8853-2020-4-42-49.

УДК 004.896

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-321-324

А. А. Соколова*

магистрант

А. Ю. Сыщиков*

старший преподаватель

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К ЗАДАЧАМ НА ГРАФАХ

Приведен обзор методов машинного обучения, применимых к задачам на графах. Также приведены способы представления графа и методы применения машинного обучения к графам.

Ключевые слова: граф, машинное обучение, методы машинного обучения.

A. A. Sokolova*

Postgraduate Student

A. Yu. Syshchikov*

Senior Lecturer

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS TO PROBLEMS ON GRAPHS

This article provides an overview of machine learning methods applicable to graph tasks. It also provides a summary of how to represent graphs and a description of the machine learning application to graphs.

Keywords: graph theory, machine learning, machine learning methods.

Введение

В настоящее время большой популярностью пользуется представление данных в виде графов, поскольку это очень удобно для понимания в том контексте, в котором используется граф, например, граф, отображающий структуру сети или граф, показывающий связи атомов в молекуле. Иногда возникают задачи, в которых важно, как именно представляется граф, или задачи, для которых важно сократить размерность графа. Для решения задач, связанных с графами, могут использоваться методы машинного обучения.

Граф и виды представления графа

Графом называют абстрактное представление множества элементов и связей между ними (рис. 1) [1]. Под графом подразумевают совокупность двух множеств: множества вершин V и множества пар связей (ребер) – E .

В основном различают два вида графов ориентированные (рис. 2) и неориентированные (рис. 1).

Существует несколько способов представления графа [2]:

1) матрица смежности – квадратная матрица $N \times N$, где N – количество вершин, а элемент такой матрицы равен 0 или 1 и обозначает отсутствие или наличие связи между соответствующими вершинами соответственно;

2) матрица инцидентности – матрица, у которой число строк равно количеству вершин, а ко-

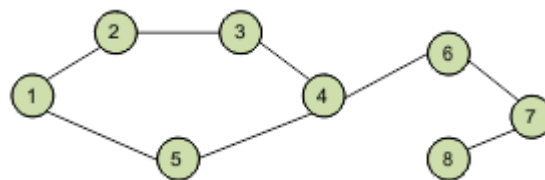


Рис. 1. Схематическое изображение графа

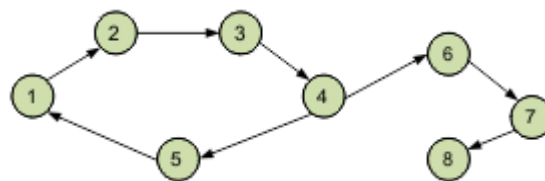


Рис. 2. Ориентированный граф

личество столбцов числу ребер. В такой матрице есть необходимость нумеровать ребра, а это не всегда удобно. Элемент такой матрицы принимает значения $-1, 0, 1$, что означает ребро входит в вершину, ребро отсутствует и ребро выходит из вершины;

3) список смежности (инцидентности) – похож на матрицы смежности и инцидентности, но менее затратен по памяти;

4) список ребер.

Машинное обучение и методы машинного обучения

Машинное обучение является одним из важнейших разделов искусственного интеллекта и представляет из себя целый класс различных методов, сочетающих в себе средства теории вероятностей, теории графов, методов оптимизации, математической статистики, математического анализа и др. [3].

К методам машинного обучения обычно относятся [4]:

- 1) статистическая классификация;
- 2) классификация на основе сходства;
- 3) классификация на основе разделимости;
- 4) нейронные сети;
- 5) индукция правил (поиск закономерностей);
- 6) кластеризация;
- 7) регрессия;
- 8) алгоритмические композиции;
- 9) сокращение размерности;
- 10) выбор модели;
- 11) байесовский вывод.

Самыми важными методами машинного обучения, которые обычно применяют к задачам на основе графов, являются методы сокращения размерности, нейронные сети и кластеризация, причем эти методы иногда используются в совокупности.

Методы сокращения размерности

Методы сокращения размерности представляют из себя целый класс методов преобразования данных. Важным методом из этого класса является метод главных компонент (PCA – Principal Component Analysis), который часто применяют в таких областях как компьютерное зрение, распознавание образов и сжатие данных [5].

Данный метод представляет собой технологию многомерного статистического анализа, который используется для сокращения размерности пространства признаков, причем с минимальной потерей полезной информации.

С точки зрения математики данный метод является ортогональным линейным преобразованием, отображающим данные исходного пространства признаков в новое пространство [6].

Формальное описание данного метода заключается в том, что имеется матрица X размером $I \times J$, у которой I – число строк (образцов), J – число столбцов (независимых переменных). В методе используются формальные переменные t_a , которые являются линейной комбинацией исходных переменных x_j ($j=1, \dots, J$) [7]:

$$t_a = p_{a1}x_1 + \dots + p_{aJ}x_J. \quad (1)$$

Так, исходная матрица X разлагается на две матрицы, точнее на их произведение:

$$X = TP^t + E = \sum_{a=1}^A t_a p_a^t + E. \quad (2)$$

Переменные t_a называются главными компонентами, а число A – число главных компонент.

На рис. 3 приведено схематичное описание формулы (2).

Матрица T носит название матрицы счетов, которая имеет размерность $I \times A$, матрица P называется матрицей нагрузок и имеет размер-

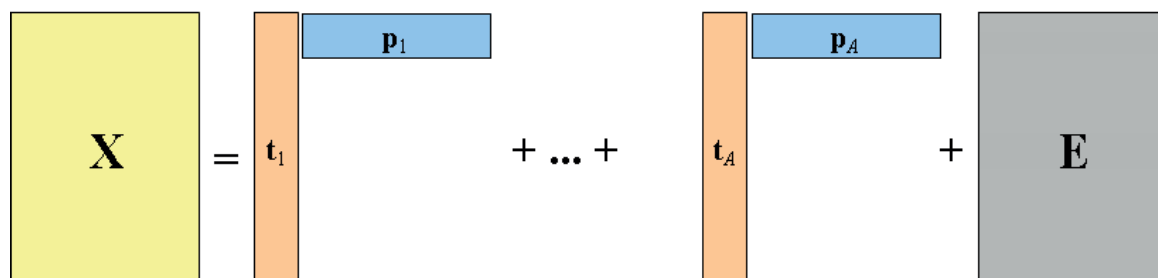


Рис. 3. Разложение по главным компонентам

ность $J \times A$, а матрица E – матрица остатков размерностью $I \times J$.

Для вычисления счетов и нагрузок в методе часто используют рекуррентный алгоритм, который на каждом шаге вычисляет одну компоненту. Также перед применением метода главных компонент исходные данные центрируются или нормируются, а иногда и центрируются, и нормируются.

Операция центрирования представляет собой вычитание из каждого столбца x_j среднего значения этого столбца m_j . Данную операцию можно представить в виде следующей формулы:

$$x'_j = x_j - m_j = x_j - \frac{\sum_{i=1}^I x_{ij}}{I}. \quad (3)$$

Преобразование, выравнивающее вклад разных переменных в модель РСА, называется нормированием. Данное преобразование делит каждый столбец на стандартное отклонение столбца. Стандартное отклонение может быть представлено следующей формулой:

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I (x_{ij} - m_j)^2}{I}}. \quad (4)$$

Автошкалирование или преобразование совмещающее в себе нормирование и центрирование выглядит следующим образом:

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{s_j}. \quad (5)$$

Для некоторых наборов данных не нужно делать центрирование и нормирование, поскольку они априори могут предполагать однородность.

Нейронные сети

В последние годы все больше набирает популярность использование нейронных сетей в работе с графами, а именно особый класс нейронных сетей – графовые нейронные сети (GNNs – Graph Neural Networks) [8]. Данный вид нейронных сетей работает непосредственно со структурой графа и позволяет решать задачи, связанные с классификацией узлов.

Структурная информация о графе раньше являлась шагом предварительной подготовки в нейронных сетях, причем эта информация составлялась вручную. В нынешнее время этот шаг рассматривается как одна из задач машинного обучения.

Современные алгоритмы представления узлов графа опираются на прямое кодирование, это означает что информация хранится в явном виде. Такие подходы базируются на классических методах факторизации матрицы (смежности, например) для уменьшения размерности и масштабирования. Сейчас различают два подхода: подход, основанный на матричной факторизации и подход, основанный на случайных прогулках.

Последние разработки в сфере представления узлов используют автоэнкодер окрестностей (DNCR/SDNE), агрегацию окрестностей и другие алгоритмы.

Основным входным сигналом для алгоритма обучения представлений является неориентированный граф $G = (V, E)$ со связанной двоичной матрицей смежности A . Методы могут использовать вещественную матрицу атрибутов узла $X \in R^{m \times |V|}$. Цель состоит в том, чтобы использовать информацию, содержащуюся в A и X , чтобы отобразить каждый узел или подграф на вектор $z \in R^d$, где $d \ll |V|$.

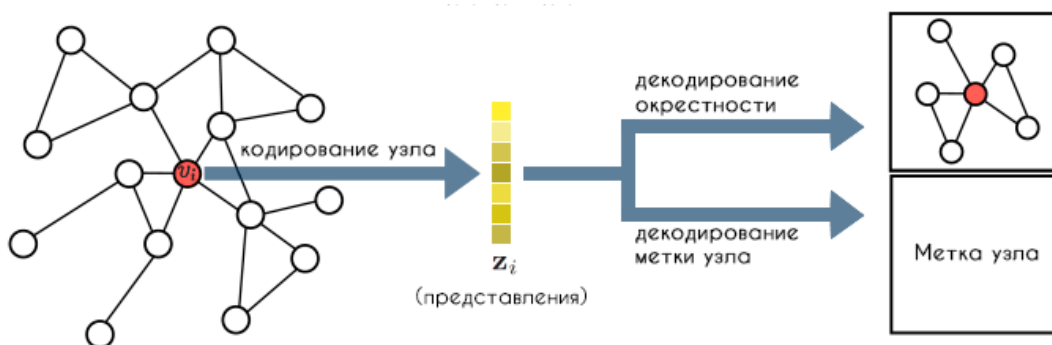


Рис. 4. Подход кодер-декодер

Подход кодер-декодер (рис. 4), относящийся к алгоритмам прямого кодирования, заключается в том, что сначала кодер отображает узел v_i в низкоразмерное векторное вложение z_i на основе положения узла в графе, его структуры локальных окрестностей или его атрибутов, а затем декодер извлекает указанную пользователем информацию из низкоразмерного внедрения. Совместно оптимизируя кодер и декодер, система учится сжимать информацию о структуре графа в низкоразмерное пространство представлений [9].

После оптимизации системы кодер-декодер можно использовать обученный кодер для генерации представлений для узлов, которые затем можно использовать в качестве входных данных для задач машинного обучения (например, классификации узлов).

Методы, относящиеся к подходам прямого кодирования, имеют ряд недостатков:

- методы являются трансдуктивными, т. е. могут генерировать только представления тех узлов, которые участвовали в процессе обучения;
- методы не позволяют использовать атрибуты узла при кодировании;
- кодер является просто поиском представлений.

Для избавления от этих недостатков используют специальные кодеры, которые используют структуру графа. Эти кодеры используются в методах глубокого отображения графа (DNGR) и структурной глубокой сети представлений (SDNE), но эти методы все еще имеют недостаток – трансдуктивность.

Заключение

В данной статье были рассмотрены различные методы машинного обучения для решения

задач, связанных с графами. Данные методы похожи, но имеют ряд различий, поэтому при решении определенной задачи на графе, например, визуализации графа, необходимо учитывать особенности метода и имеющиеся данные о графе.

Библиографический список

1. Алгоритмы на графах – Часть 0: Базовые понятия. URL: <https://habr.com/ru/post/65367/> (дата обращения: 04.12.2020).
2. Структуры данных / Граф. URL: <https://prog-cpp.ru/data-graph/> (дата обращения: 04.12.2020).
3. Машинное обучение. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Машинное_обучение (дата обращения: 05.12.2020).
4. Машинное обучение. URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Машинное_обучение (дата обращения: 05.12.2020).
5. Метод главных компонент. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_главных_компонент (дата обращения: 06.12.2020).
6. Метод главных компонент (Principal component analysis). URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/principal-component-analysis.html> (дата обращения: 06.12.2020).
7. Померанцев А. Метод Главных Компонент (PCA). 2008. URL: <https://www.chemometrics.ru/old/Tutorials/pca.htm#Ch2> (дата обращения: 07.12.2020).
8. Теория графов в машинном обучении для самых маленьких. 2020. URL: <https://habr.com/ru/post/487138/> (дата обращения: 07.12.2020).
9. William L. Hamilton, Rex Ying, Jure Leskovec. Representation Learning on Graphs: Methods and Applications. URL: <https://www-cs.stanford.edu/people/jure/pubs/graphrepresentation-ieee17.pdf> (дата обращения: 07.12.2020).

УДК 004.7; 004.9

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-325-338

Е. А. Суворова*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МЕХАНИЗМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ ДЛЯ СЕТЕЙ SPACEFIBRE

Требования реального времени очень важны для большинства систем аэрокосмического назначения. Для поддержки механизмов реального времени необходима синхронизация времени во всей сети, во всех сетевых устройствах. Стандарт SpaceFibre разработан для аэрокосмических сетей. Однако текущая версия этого стандарта не включает какой-либо механизм синхронизации времени. В этой статье мы рассматриваем механизмы синхронизации времени, поддерживаемые стандартами, которые в настоящее время используются для аэрокосмических систем, и предлагаем несколько механизмов для синхронизации времени в сетях SpaceFibre. Мы приводим оценки достижимой точности синхронизации для предлагаемых механизмов. В статье предлагается реализация предложенных механизмов на основе динамически реконфигурируемого блока контроллера локального времени. Эта реализация позволила оценить достижимые характеристики всех предложенных механизмов. Планируется использовать его в дальнейших исследованиях, поскольку он обеспечивает возможность перенастройки для реализации других режимов. В статье мы показываем, что в разных сетях может быть целесообразно использовать разные механизмы синхронизации в зависимости от требований пользователя. Наша реализация с динамической реконфигурацией предоставляет возможность использования различных механизмов, в том числе при реализации с использованием технологии ASIC.

Ключевые слова: реальное время, локальные вычислительные сети аэрокосмического назначения, SpaceFibre, качество сервиса.

E. A. Suvorova*

PhD, Tech., Associate Professor

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

TIME SYNCHRONIZATION MECHANISMS FOR SPACEFIBRE NETWORKS

Real-time requirements are very important for most aerospace systems. To support real-time mechanisms, time synchronization is required throughout the network, in all network devices. SpaceFibre is developed for aerospace networks. However, the current version of this standard does not include any time synchronization mechanism. In this article, we look at the time synchronization mechanisms supported by the standards currently used for aerospace systems, and suggest several mechanisms for time synchronization in SpaceFibre networks. We present estimates of the achievable synchronization accuracy for the proposed mechanisms. The paper proposes the implementation of these mechanisms based on a dynamically reconfigurable unit of the local time controller. This implementation made it possible to evaluate the achievable characteristics of all proposed mechanisms. It is planned to use it in further research, since it provides the ability to reconfigure to implement other modes. In this paper, we show that in different networks it may be appropriate to use different synchronization mechanisms depending on the user's requirements. Our implementation with dynamic reconfiguration provides the ability to use various mechanisms, including when implemented using ASIC technology.

Keywords: real time, local networks for aerospace equipment, SpaceFibre, QoS.

Введение

Стандарт SpaceFibre был разработан специально для аэрокосмических локальных сетей. Большинство систем аэрокосмического назначения функционируют в реальном времени. Степень строгости требований реального времени может варьироваться в зависимости от назначения сетей. Для некоторых систем приемлема точность в несколько мс, для других систем требуется точность в несколько мкс, в некоторых случаях может потребоваться более высокая точность [1–3].

Для реализации механизмов реального времени, в частности гарантированного времени

доставки данных, требуется синхронизация времени во всех сетевых устройствах (маршрутизаторах и терминальных узлах). Достижимые характеристики механизмов реального времени будут зависеть от точности синхронизации времени в сети.

Синхронизация отсчета времени в устройствах необходима по нескольким причинам. Во-первых, счетчик времени работает, используя часы, генерируемые PLL. Форма тактового сигнала, генерируемого PLL, не идеальна. Это влияет на точность отсчета времени.

Во-вторых, в начале работы системы устройства, как правило, не включаются строго одновременно. Кроме того, различным PLL может

потребуется разное время после включения питания для начала генерации тактового сигнала. Некоторые устройства могут включиться через некоторое время после запуска системы. Например, это может произойти, если в сети используется холодное резервирование или некоторые устройства не используются в течение некоторых периодов работы системы.

Из-за этих факторов синхронизация времени в устройствах необходима на протяжении всей работы сети.

Текущая версия стандарта SpaceFibre [4] не определяет механизмы синхронизации времени. В этой статье мы предлагаем механизмы синхронизации времени для сети SpaceFibre. Для предложенных механизмов оценивается достижимая точность синхронизации.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 мы кратко описываем существующие подходы к синхронизации времени в локальных сетях, которые поддерживают сервисы реального времени. Раздел 3 посвящен предлагаемым механизмам синхронизации времени для стандарта SpaceFibre. В разделе 4 мы описываем предлагаемую реализацию механизмов. В разделе 5 мы оцениваем достижимую точность синхронизации времени с использованием предложенных механизмов. Раздел 6 завершает статью.

Обзор существующих подходов к синхронизации времени в локальных сетях с поддержкой реального времени

В этом разделе мы рассматриваем стандарты и протоколы, которые изначально были ориентированы на использование в системах реального времени, в том числе жесткого, и которые сейчас активно используются в аэрокосмических сетях.

Протокол синхронизации времени в сети (network time protocol (NTP)). Первый протокол для синхронизации времени – сетевой протокол времени (NTP) [5] был разработан в 1985 г. Он был ориентирован, в первую очередь, на сети на базе Ethernet. При использовании этого протокола предполагается, что существует хотя бы один источник точного времени (астрономический), подключенный к одному или нескольким абонентам сети – первичным серверам времени.

Текущее время представлено 64-битным числом, предполагающим время, прошедшее с 0000 UT 1 января 1900 г. Точность представления времени составляет 0,2 нс. В рамках этого протокола возможен симметричный режим, в котором два устройства синхронизируют вре-

мя друг друга, и режим клиент-сервер, в котором время клиента синхронизируется со временем сервера. В больших сетях может быть построена иерархическая структура серверов. Чем выше уровень иерархии серверов, тем точнее его время. Серверы на более высоких уровнях иерархии синхронизируют время на серверах на более низких уровнях иерархии. Те, в свою очередь, синхронизируют время в клиентах.

Во всех режимах синхронизация времени выполняется через равные промежутки времени. Значение периода (длительность интервала синхронизации) выбирается для конкретной сети в соответствии с требуемыми временными характеристиками.

Для синхронизации времени устройства обмениваются сообщениями, содержащими информацию о текущем времени и отметках времени, чтобы учитывать время передачи сообщений между устройствами. Этот протокол может обеспечить точность синхронизации только порядка миллисекунд [6].

Стандарт IEEE 1588. В 2002 г. были разработаны стандарт и протокол IEEE 1588 [7]. Этот протокол обеспечивает существенно более высокую по сравнению с NTP точность синхронизации – до наносекунд. В соответствии с этим стандартом в сети есть мастер времени, который синхронизирует время на других устройствах. Ведущее устройство (мастер времени) и синхронизируемое ведомое устройство обмениваются сообщениями. (Мастер времени и это устройство напрямую связаны друг с другом.)

Мастер времени отправляет сообщения Sync и Followup. Sync содержит значение времени в мастере времени, а Followup содержит значение времени, когда сообщение Sync было отправлено аппаратно от мастера. Затем синхронизированное ведомое устройство отправляет сообщение DelayReq, которое позволяет нам оценить время передачи данных между синхронизированным ведомым устройством и ведущим устройством времени. В ответ мастер времени отправляет DelayResp, который содержит информацию о времени, когда он получил DelayReq.

В результате синхронизированное ведомое устройство может оценить время передачи сообщения между ним и ведущим устройством времени в соответствии со своим локальным временем. Далее ведомое устройство выполняет коррекцию значения своих локальных часов с учетом информации о временах передачи и в предположении, что каналы передачи между ведущим и ведомым и между ведомым и ведущим симметричны.

Если разница во времени большая, применяется корректировка абсолютного времени. В противном случае к ведомым часам применяется процентное изменение частоты.

В 2008 г. была разработана новая версия этого стандарта, позволяющая выполнять синхронизацию времени между парой устройств, связь между которыми включает один или несколько транзитных маршрутизаторов [8].

Следует отметить, что точность временной синхронизации при использовании этого стандарта очень сильно зависит от особенностей реализации сетевых устройств (характеристик локального тактового сигнала, реализации трактов передачи данных), используемого в сети стандарта передачи данных, скорость передачи данных по физическим каналам, размер сети (расстояние между источником синхронизации и синхронизируемым устройством).

IEEE 1588 является основой для методов синхронизации времени в нескольких стандартах, широко используемых в аэрокосмических сетях: TTEthernet, FiberChannel, Serial Rapid IO. Однако наряду с этим протоколом в этих стандартах могут быть реализованы и другие методы синхронизации времени.

TTEthernet. В TTEthernet реализован механизм синхронизации в соответствии со стандартом IEEE 1588 как надстройка над основным набором механизмов. TTEthernet предоставляет средства для компенсации задержек в сети TTEthernet. Достижимая точность синхронизации составляет несколько мкс [9–11].

Наряду с этим в TTEthernet существует другой метод синхронизации времени. Данный метод позволяет парировать ошибки, которые могут возникать в источнике синхронизации времени [11].

В рамках этого подхода используется двухэтапный подход к синхронизации. На первом этапе мастера синхронизации отправляют кадры с информацией о времени мастерам сжатия. Затем мастера сжатия вычисляют среднее значение по относительному времени прибытия этих кадров и на втором этапе отправляют новый кадр с информацией о времени клиентам синхронизации [11]. Достижимая точность синхронизации – 1 мкс.

Fibre channel. Fibre Channel включает в себя протокол синхронизации, основанный на стандарте IEEE 1588 [12]. Обычно период синхронизации составляет 10 – 20 мс [13]. Достижимая точность синхронизации – 1 мкс.

Для FibreChannel также реализованы другие протоколы синхронизации времени, в частности сетевой протокол времени. Однако достижи-

мая точность синхронизации времени для них невысока. Для протокола сетевого времени это обычно от 1 миллисекунды до 50 микросекунд.

Serial RapidIO. Механизм синхронизации времени не специфицирован в стандарте Serial RapidIO. Существуют реализации метода синхронизации на основе IEEE 1588 для сетей на основе Serial RIO. Эти реализации обеспечивают точность синхронизации 20 мс без использования дополнительного оборудования для синхронизации (реализованы программно) [14].

SpaceWire. Механизм синхронизации времени, специфицированный в стандарте SpaceWire, существенно отличается от IEEE 1588. В SpaceWire для синхронизации времени используются специальные управляющие коды – маркеры времени. Эти управляющие коды имеют наивысший приоритет при передаче в физический канал, что сводит к минимуму задержки передачи в сети. Эти управляющие коды передаются по сети от источника ко всем маршрутизаторам и терминальным узлам в сети. Источник времени периодически отправляет маркеры времени, и они используются для синхронизации часов на всех сетевых устройствах (терминальных узлах и маршрутизаторах). Отправка одного маркера времени позволяет нам синхронизировать время на всех устройствах в сети [15]. Это отличает этот подход от IEEE 1588, в котором каждое устройство синхронизируется отдельно. Соответственно, при использовании этого подхода накладные расходы (нагрузка на сеть) и время синхронизации для всех устройств значительно меньше, чем при использовании IEEE 1588. Однако при использовании подхода SpaceWire нет способа оценить время передачи между устройствами на повысить точность синхронизации.

Точность временной синхронизации при использовании подхода SpaceWire зависит от размера сети (максимального количества транзитных маршрутизаторов от источника времени до узлов сети), скорости передачи по физическим каналам. Если скорость составляет 400 Мбит/с, то в сети, в которой максимальное расстояние между источником времени и узлами не превышает 10 транзитных маршрутизаторов, точность синхронизации времени составляет около 2 мкс. Достижимая точность при использовании подхода SpaceWire не хуже, чем для рассмотренных выше стандартов с реализацией IEEE 1588. Это достигается за счет полностью аппаратной реализации механизма, высочайшего приоритета временных маркеров и небольшой длины этих символов, что позволяет быстро передавать их по сети.

Предлагаемые для стандарта SpaceFibre механизмы синхронизации

Механизм 1.

Первый из предложенных механизмов основан на использовании для синхронизации кодов времени, периодически отправляемых источником времени на все устройства (маршрутизаторы и терминальные узлы) сети. В каждом устройстве (маршрутизаторе, оконечном узле) есть счетчик локального времени. В сети есть устройство (группа устройств), являющееся источником времени. (В данной статье мы не рассматриваем вопросы обеспечения устойчивости к сбоям источника времени; это предмет отдельного рассмотрения).

Источник времени отправляет коды времени, которые используются для синхронизации локальных счетчиков времени на всех сетевых устройствах (маршрутизаторах и терминальных узлах) с периодом T (период синхронизации). В качестве кодов времени могут использоваться маркеры времени или широковещательные сообщения (ниже мы рассмотрим реализации механизма с использованием маркеров времени и широковещательных сообщений). Период синхронизации (T) – это параметр, определяемый проектировщиком сети. Период синхронизации зависит от размера, структуры сети связи, скорости передачи, требуемого значения точности синхронизации (JT).

Значение локального счетчика времени в каждом устройстве может корректироваться в соответствии с приемом кодов времени от источника времени. После включения, после сброса устройства счетчик времени устанавливается на 0.

Отсчет времени на всех устройствах, кроме источника времени, запрещен до появления первого правильного кода времени. Счетчик времени запускается при получении правильного кода времени. Затем время отсчитывается циклически в диапазоне от 0 до T .

Мы предлагаем следующий подход к корректировке счетчика времени (однако в этом механизме могут использоваться и другие подходы, например [7], выбор подхода является предметом дальнейших исследований).

(1) Если счетчик времени достигает $T-1$, следующий код времени не поступает, счетчик времени сбрасывается в 0, и отсчет времени продолжается.

(2) Если в следующий раз маркер прибывает на устройство, когда значение счетчика $\in (T-1-DP, 0 + DP)$, где DP – параметр, значение которого зависит от джиттера времени доставки

в сети, то когда он получил, никаких дополнительных действий не производится. (Считается, что эта ситуация вызвана джиттером времени доставки временного кода и / или джиттером точности счета в рассматриваемом устройстве, причем оба джиттера находятся в допустимых пределах). Ситуация (2) потенциально поглощает ситуацию (1), если временной код попал в интервал значений счетчика $(0, 0 + DP)$.

(3) Если следующий код времени поступает на устройство при значении счетчика $\in (T-1-DP, 0 + DP)$, значение счетчика корректируется, в текущем варианте мы устанавливаем его на 0.

В дальнейшем планируется рассмотреть другие варианты корректировки счетчика времени.

Как отмечалось выше, маркеры времени или широковещательные сообщения могут использоваться в качестве кодов времени для реализации этого механизма. Формат маркера времени показан на рис. 1.

Формат широковещательного сообщения показан на рис. 2.

Маркеры времени в 4 раза короче широковещательных сообщений. (Длина маркера времени составляет 4 байта, длина широковещательных сообщений – 16 байтов). Таким образом, маркеры времени распространяются по сети быстрее, чем широковещательные сообщения. В следующем разделе мы рассмотрим, как это влияет на точность синхронизации.

Широковещательное сообщение включает в себя 8-байтовое поле данных, которое может содержать дополнительную информацию. Мы предлагаем использовать это поле для повыше-

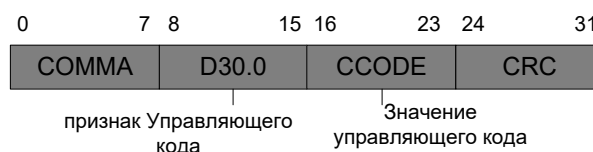


Рис. 1. Формат маркера времени

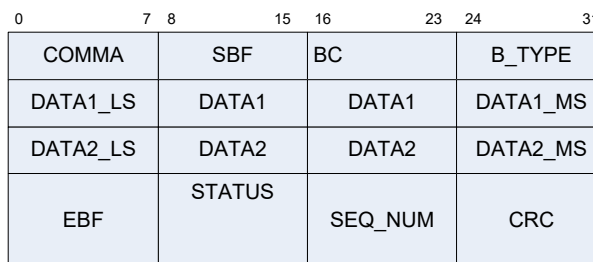


Рис. 2. Формат широковещательного сообщения

ния точности синхронизации. Поскольку ширококлетчатное сообщение имеет фиксированную длину, время его передачи по физическому каналу между соседними устройствами постоянно (согласно стандарту SpaceFibre скорость передачи по физическому каналу не изменяется во время работы).

Согласно стандарту SpaceFibre порты устройств реализованы как наборы конечных автоматов. Ширококлетчатное сообщение имеет наивысший приоритет среди объектов данных SpaceFibre, поэтому единственным источником недетерминированности его передачи/приема через порт SpaceFibre является передача символа, которая уже была начата, когда ширококлетчатное сообщение поступило в выходной порт. Таким образом, для каждого порта каждого устройства на этапе проектирования может быть определена минимальная задержка передачи ширококлетчатного сообщения (без учета вышеуказанного недетерминизма). На этапе разработки сети для каждого физического канала может быть определена задержка передачи сообщения Broadcast в нем. Каждое устройство может хранить таблицу коэффициентов, соответствующих этим задержкам (задержка выходного порта, задержка физического канала и задержка входного порта).

Когда ширококлетчатное сообщение проходит по сети, поле данных ширококлетчатного сообщения может использоваться для хранения информации об этих задержках. В источнике времени в поле данных ширококлетчатного сообщения устанавливается значение задержки, соответствующее выходным портам этого устройства. Далее в каждом транзитном маршрутизаторе это значение увеличивается с учетом задержек в его портах и физических каналах между устройствами.

Таким образом, постоянная часть задержки ширококлетчатной передачи может быть учтена при синхронизации каждого устройства.

Механизм 2.

Второй предложенный механизм основан на стандарте IEEE 1588 (режим master-slave).

Для его реализации используются ширококлетчатные сообщения. Как отмечалось выше, они включают в себя 8-байтовое поле данных, которое позволяет передавать метку времени, необходимую для реализации механизма на основе IEEE 1588. Однако для реализации этого механизма пришлось изменить правила рассылки ширококлетчатных сообщений. Ширококлетчатное сообщение, используемое для синхронизации времени, не должно транслироваться по сети, а передается только между па-

рой соседних устройств (ведущее и ведомое) во время синхронизации.

Следующая последовательность используется для синхронизации часов сетевых устройств. Устройство – источник времени выполняет синхронизацию времени на соседних устройствах (устройствах, напрямую подключенных к нему через физические каналы). Эти устройства могут быть как маршрутизаторами, так и терминальными узлами. Источник времени действует как ведущий, эти устройства действуют как ведомые. Далее, каждое из этих устройств выполняет синхронизацию времени соседних с ним устройств, для которых это еще не было выполнено. Теперь оно действует как ведущее. Таким образом, процесс синхронизации времени распространяется по сети волной от источника времени.

Граф физических соединений между устройствами сети SpaceFibre может иметь циклы. Чтобы исключить заикливание процесса распространения синхронизации времени по сети, мы используем нумерацию циклов синхронизации. (Мы называем циклом синхронизации процесс, в котором волна синхронизации времени от источника времени будет распространяться по сети, достигая каждого устройства). Каждый цикл синхронизации имеет порядковый номер от 0 до 3 (номер изменяется циклически). Сообщения, которыми обмениваются ведущий и ведомый во время синхронизации, включают порядковый номер цикла синхронизации. Если устройство уже синхронизировало время в i -м цикле синхронизации и снова получает сообщение синхронизации, оно игнорирует его (не выполняет действие синхронизации снова).

Пример нескольких шагов последовательно синхронизации времени в устройствах для сети (граф этой сети содержит циклы) показан на рис. 3. В этом примере показаны первые три шага синхронизации цикла синхронизации с порядковым номером 0. Устройства, которые уже были синхронизированы, отмечены черным. Синхронизируемые устройства отмечены серым цветом. Черные стрелки отмечают связи между ведущим и ведомым, между которыми выполняется процесс синхронизации времени. Серыми стрелками отмечены связи, по которым мастер отправляет сообщения синхронизации на уже синхронизированное устройство, поэтому они игнорируются (повторная синхронизация не выполняется).

Рассмотрим процесс обмена сообщениями между ведущим и ведомым, выполняемый на каждом шаге. Согласно IEEE 1588, он включает четыре этапа. На первом этапе ведущий отправ-

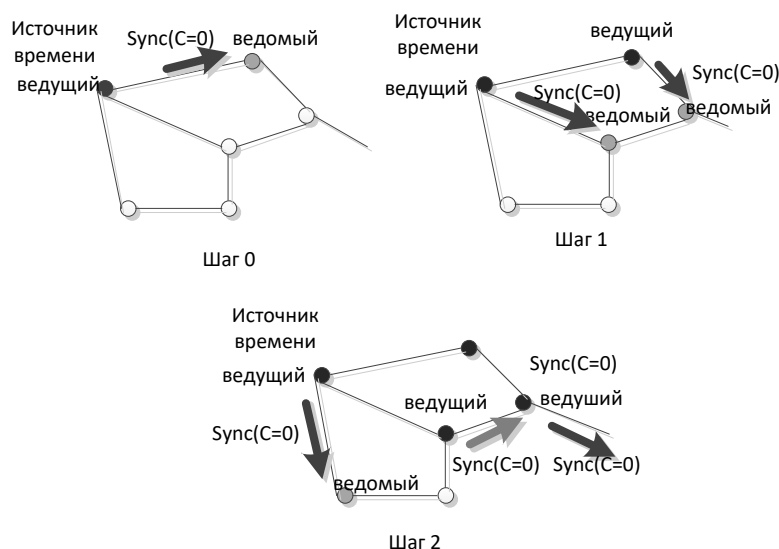


Рис. 3. Пример выполнения нескольких шагов процесса синхронизации времени

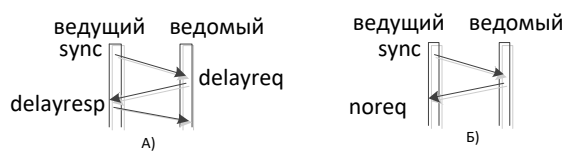


Рис. 4. Последовательность сообщений, которыми обмениваются ведущий и ведомый

0	7	8	15	16	23	24	31
COMMA	SBF		BC	B_TYPE			
DATA1_LS	DATA1		DATA1	DATA1_MS			
DATA2_LS	DATA2		DATA2	DATA2_MS			
EBF	STATUS		SEQ_NUM		CRC		
		T C	Cycle number		Message_type		

Рис. 5. Предлагаемый формат широковещательного сообщения

ляет сообщения ведомому, на втором этапе ведомый отправляет сообщения ведущему, на третьем этапе ведущий отправляет сообщения ведомому. На четвертом этапе ведомое устройство корректирует свой счетчик времени (при необходимости).

Поскольку в нашей реализации все действия выполняются аппаратно, на первом этапе син-

хронизации нет необходимости отправлять два сообщения от ведущего к ведомому. Метка времени, созданная оборудованием, может быть помещена в самое первое сообщение. Последовательность сообщений, которыми обмениваются ведущий и ведомый, показана на рис. 4.

Если время для ведомого еще не синхронизировано в текущем цикле синхронизации, оно отправляет сообщение delayreq. В случае, если время уже было синхронизировано, ведомое устройство отправляет сообщение noreq, указывающее ведущему, что синхронизация не требуется. В этом случае шаги 3 и 4 не выполняются.

Алгоритм из IEEE 1588 используется для вычисления разницы счетчика времени между ведущим и ведомым устройством на четвертом шаге.

Для передачи информации о номере цикла синхронизации и типе сообщения (sync, delayreq, delayresp, noreq) мы внесли дополнения в формат широковещательного сообщения. В поле Status, биты 5-0 которого не используются в базовой версии стандарта, мы определили два подполя – cycle_number (биты 1: 0) и message_type (биты 3: 2). На рис. 5 показан формат широковещательного сообщения с этими модификациями.

Предлагаемая реализация механизмов

Достижимая точность синхронизации времени зависит не только от используемого механизма синхронизации, но и от того, реализован ли он программно или аппаратно. Поскольку программные реализации обеспечивают значи-

тельно худшую достижимую точность синхронизации [6, 13, 14], мы используем аппаратную реализацию, которая описана в этом разделе.

Поскольку оценка характеристик будет производиться для разных механизмов, мы разработали динамически реконфигурируемый блок для их реализации – блок контроллера локального времени. Этот блок выполняет счет времени, обрабатывает полученные коды времени (метки времени, широковебательные сообщения), контролирует их дальнейшее распространение (по правилам, соответствующим рассматриваемому механизму синхронизации), при необходимости настраивает счетчик времени (в соответствии с рассматриваемым механизмом синхронизации).

Устройство этого блока аналогично предложенному нами в [16]. В этом случае, в отличие от варианта, предложенного в [16], память используется не для хранения обработанных данных (так как в этом случае размер объектов данных не превышает 16 байт), а для хранения таблицы задержек передачи через порты и физических каналы. Размер памяти (байты) составляет

$$Msize=2*2*Np, \quad (1)$$

где Np – количество портов SpaceFibre в устройстве.

Для каждого порта сохраняется общая задержка на входе, задержка обработки, задержка в подключенном к нему физическом канале (2 байта) и задержка на выходе порта (2 байта).

Блок контроллера локального времени включает 16 регистров и 20 флагов.

Реконфигурируемый DataPath включает набор ФМ (Функциональных модулей) для выполнения команд сложения / вычитания / сравнения, умножения и деления, поскольку этот набор команд используется во всех предлагаемых механизмах. В текущей реализации есть четыре ФМ сложения / вычитания / сравнения, 2 ФМ умножения, 1 ФМ деления.

Максимальное количество состояний реконфигурируемого автомата – 16 (для реализации каждого из предложенных механизмов синхронизации требуется не более 10 состояний).

Входной интерфейс включает в себя вход маркера времени, полученного из сети с флагом достоверности, и номер порта, из которого он пришел, вход широковебательного сообщения, полученного из сети с флагом достоверности, и номер порта, из которого оно пришло.

Выходной интерфейс включает в себя выход маркера времени, который должен быть отправлен в сеть, набор флагов портов, на которые он

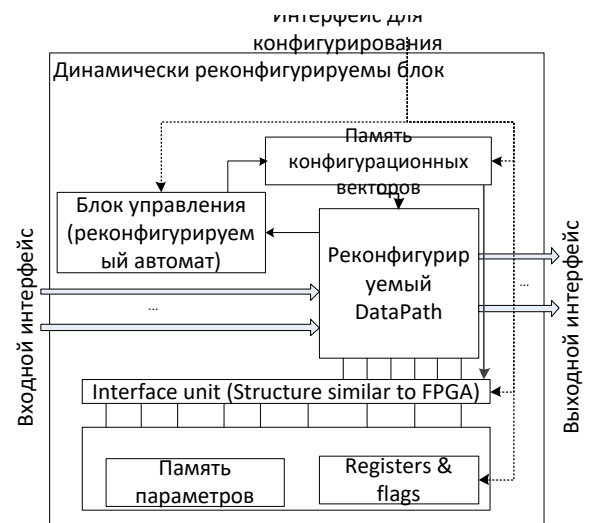


Рис. 6. Структура динамически реконфигурируемого блока контроллера локального времени

должен быть отправлен, выход широковебательного сообщения, которое должно быть отправлено в сеть, набор флагов портов, на который нужно отправить это сообщение, текущее значение счетчика времени.

Этот реконфигурируемый блок использовался для реализации всех предложенных механизмов. Площадь этого блока (реализация с ASIC) меньше суммарной площади реализаций каждого механизма.

В дальнейшем мы планируем использовать его для реализации различных алгоритмов коррекции счетчика времени, для реализации механизмов синхронизации, обеспечивающих механизмы устранения неисправностей для дальнейшего исследования.

Оценка точности синхронизации достижимой при использовании предложенных механизмов

Как отмечалось выше, расхождение между счетчиками времени в разных устройствах происходит из-за параметров PLL и из-за задержек распространения кодов времени.

Оценим составляющую задержки, которая появляется из-за характеристик PLL. Она не зависит от используемого механизма синхронизации, но зависит от свойств используемых PLL.

Достижимая точность подсчета периодов времени в каждом сетевом устройстве (маршрутизаторе, терминальном узле) зависит от используемой PLL, которая является источником синхронизации для счетчика.

Существующие в настоящее время PLL не могут генерировать сигнал тактирования с идеальной формой без дрожания и дрейфа фазы (частоты). Рассмотрим основные параметры, характеризующие тактовый сигнал, формируемый в системе PLL.

Дрейф фазы (частоты) означает изменение (уменьшение или увеличение) длительности периода тактового сигнала во времени. Дрейф фазы (частоты) и джиттер связаны [17–20].

Конкретная форма тактового сигнала может характеризоваться джиттером периода, межаттактовым джиттером, дрожанием временного интервала [18–20].

Джиттер периода измеряет максимальное отклонение каждого отдельного периода колеблющегося тактового сигнала от идеального тактового сигнала.

$$PeriodJitter = \max_{k=0,1,2,3} (|P_k - C_0|), \quad (2)$$

где C_0 – период идеального сигнала тактирования; P_k – длительность k -го периода реального сигнала тактирования.

Джиттер периода обычно измеряется в течение установленного количества тактов. Рекомендуется измерять джиттер за период более 100000 тактов, чтобы лучше представить джиттер за «бесконечный» промежуток времени [18–20].

Межаттактовый джиттер показывает максимальное отклонение каждого отдельного периода тактового сигнала от предыдущего периода [17–20].

$$CycleToCycleJitter = \max_{k=0,1,2,3} (|P_{k+1} - P_k|). \quad (3)$$

Джиттер временного интервала показывает максимальное отклонение фронта дрожавших часов от соответствующего фронта идеальных часов [17, 18, 19, 20].

$$TIEJitter = \max_{k=0,1,2,3} (|T_k|), \quad (4)$$

где T_k – отклонение k -го фронта реального сигнала тактирования от k -го фронта идеального сигнала тактирования.

Если $CycleToCycleJitter = C$, где C всегда больше 0 или C всегда меньше 0 для любых значений k

$$\begin{aligned} \forall k, P_{k+1} - P_k = C, C > 0 \\ \text{or} \\ \forall k, P_{k+1} - P_k = C, C < 0, \end{aligned} \quad (5)$$

тогда мы можем сказать, что есть дрейф фазы (частоты) вверх или вниз.

Согласно стандарту SpaceFibre [4] скорость передачи данных должна быть неизменной $\pm 0,01\%$. Обозначим этот параметр как A ($A = 0,01\% = 0,0001$). В реализациях используются PLL, которые обеспечивают это строгое требование. И эти PLL (PLL с такими же характеристиками) могут использоваться для генерации тактового сигнала, используемого для счетчика времени.

Это требование исключает возможность дрейфа периода тактового сигнала в течение длительного интервала времени. Однако для тактового сигнала возможен джиттер. Фактический период тактового сигнала может отклоняться от идеального тактового сигнала в пределах значения $A * C$ как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Соответственно для этого тактового сигнала:

$$\begin{aligned} PeriodJitter = TIEJitter = \\ = 2 * A * C_0 = 2 * 0,0001 * C_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Причем отклонение периода тактового сигнала от идеального может происходить в разных направлениях или преимущественно / постоянно в одном и том же направлении.

Счетчик времени в устройстве увеличивается один раз за указанное количество тактов. Если отклонение периода тактового сигнала от идеального происходит в разные стороны, то при отсчете времени отклонения компенсируются. Если отклонение происходит всегда в одном направлении, то эффект от него накапливается.

Соответственно, чтобы оценить расхождение между счетчиками времени в сетевых устройствах, мы будем рассматривать худшие случаи, когда происходит накопление отклонений вверх или вниз.

За период времени t с момента синхронизации максимальное расхождение показаний счетчиков времени из-за характеристик PLL будет:

$$\begin{aligned} Jp(t) &= 2 * t * A, \\ Jp^+(t) &= Jp^- = t * A. \end{aligned} \quad (7)$$

Например, при $t = 10 \text{ ms}$ $Jp^+(t) = Jp^-(t) = 1 \text{ мкс}$.

В результате фактическая продолжительность периода времени с эталонной длительностью T будет в пределах

$$\begin{aligned} Tr^+(t) &= T + Jp^+(T) = T * (1 + A); \\ Tr^-(t) &= T - Jp^-(T) = T * (1 - A). \end{aligned} \quad (8)$$

где Tr – фактическая длительность периода времени.

Вторая составляющая расхождения между счетчиками времени устройств – задержка, связанная с доставкой временного кода (Jd). Jd зависит от используемого механизма синхронизации.

Первый предлагаемый механизм.

Задержка распространения (время доставки) кода времени от источника времени к устройству зависит от количества транзитных маршрутизаторов и линий связи, от задержек передачи через эти маршрутизаторы и линии связи.

Поскольку время доставки кода времени по сети обеспечивает только задержку счетчика времени в устройстве i относительно источника времени, при оценке Jd мы будем учитывать только максимальное время доставки $Ttmax_i$ кода времени от источника времени до i -й устройства.

Jd можно рассчитать по следующей формуле:

$$Jd = \max_{i=1}^{K-1} (Ttmax_i), \quad (9)$$

где K – количество устройств (маршрутизаторов, конечных узлов) в сети.

Мы предполагаем, что $i = 0$ для источника времени, соответственно, $Ttmax_0 = 0$. $Ttmax_i$ можно оценить по следующей формуле:

$$Ttmax_i = \sum_{j=0}^{Mi-1} (Toutm_j + Tch_j + Tin_j + Tw_j), \quad (10)$$

где M_i – количество транзитных маршрутизаторов; $Toutm_j$ – максимальная задержка кода времени в выходном порту; Tch_j – задержка кода времени в физическом канале передачи; Tin_j – задержка кода времени на входе порта; Tw_j – время обработки кода времени.

Как отмечалось выше, поскольку входной порт и блок локального контроллера времени представляют собой набор автоматов и конфликты ресурсов отсутствуют, Tin_j и Tw_j являются константами для конкретной реализации маршрутизатора. Поскольку скорость передачи по физическому каналу не изменяется, Tch_j также является постоянной величиной. Выходной порт, как и входной порт, реализован в виде набора автоматов, но в нем возможен конфликт ресурсов – если в момент прихода временного кода уже передан другой символ, то его передача не прерывается. Поэтому мы оцениваем $Toutm_j$ для наихудшего случая: с учетом времени ожидания передачи одного символа:

$$Toutm_j = Tout_j + Ts, \quad (11)$$

где $Tout_j$ – минимальная задержка кода времени в выходном порту; Ts – время передачи одного символа.

Его можно определить по следующей формуле:

$$Ts = Ls * Tb = 40 * Tb. \quad (12)$$

Оценим отклонение счетчика времени в устройствах от счетчика времени в источнике времени (обозначим это отклонение Jt) с учетом Jp и Jd . Jd определяет задержку начала счета времени в устройстве относительно источника времени. Jp определяет отклонение продолжительности подсчитываемого периода от периода в источнике времени (счетчик в устройстве может либо отставать от счета в источнике времени, либо опережать его).

Обозначим отклонение счетчика времени в устройстве i от счетчика времени в источнике времени $Jt_i(t)$. Максимальное отклонение в большую сторону можно оценить по следующей формуле:

$$Jt_i^+(t) = Ttmax_i + Jp^+(t). \quad (13)$$

Максимальное отклонение в меньшую сторону можно оценить по следующей формуле:

$$Jt_i^-(t) = Ttmin_i - Jp^-(t), \quad (14)$$

где $Ttmin_i$ – минимальное время для передачи кода времени от источника времени до устройства. Его можно определить по следующей формуле:

$$Ttmin_i = \sum_{j=0}^{Mi-1} (Tout_j + Tch_j + Tin_j + Tw_j). \quad (15)$$

Если $Jp^-(t) \leq Ttmin_i$, то текущее значение счетчика времени в устройстве будет меньше, чем в источнике времени. Если $Jp^-(t) > Ttmin_i$, то текущее значение счетчика времени в устройстве будет больше, чем в источнике времени (счетчик в устройстве будет впереди счетчика в источнике времени).

Это проиллюстрировано на рис. 7. Вверху этого рисунка находится счетчик времени, расположенный в источнике. Жирными линиями отмечены моменты времени, когда источник времени отправляет коды времени. В нижней части рисунка показано устройство (одно из устройств в сети), счетчик времени, расположенный в нем. Пунктирными линиями отмечены моменты времени, когда код времени поступает на это устройство с минимальным и максимальным временем доставки. Пунктирными линиями отмечены моменты времени, когда в этом устройстве счетчик времени имеет значение $t1$ с максимальной задержкой относительно вре-

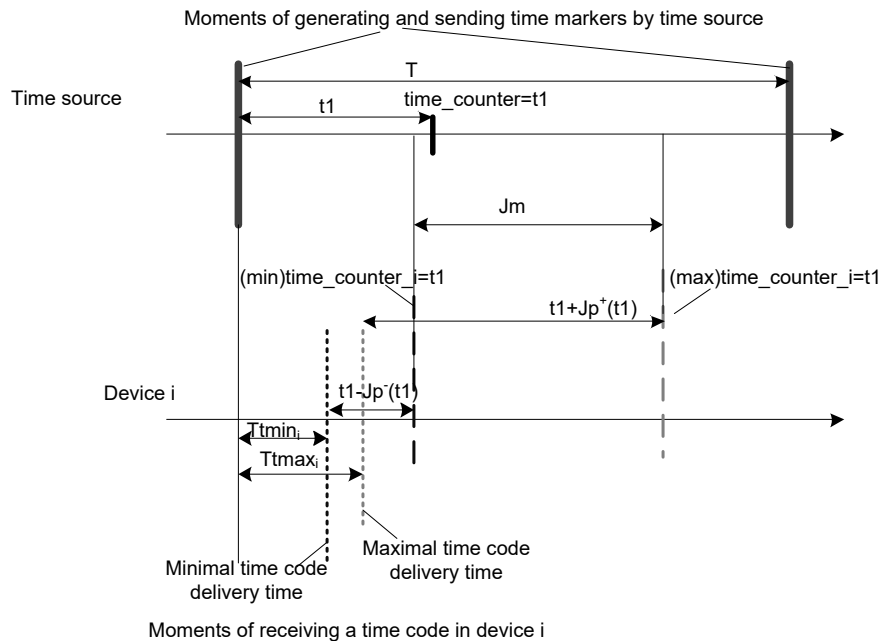


Рис. 7. Иллюстрация возможного отклонения счетчика локального времени в одном из сетевых устройств от счетчика локального времени в источнике времени

мени, когда счетчик времени в источнике времени имеет значение $t1$ и с максимальным опережением.

Jt можно определить по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 & \text{если } \forall i \in (1, K), Jp^-(T) \leq Ttmin_i \Rightarrow \\
 & Jt = Jd + Jp^+(T) = \\
 & \max_{i=1}^{K-1} (Ttmax_i) + Jp^+(T) \\
 & \text{если } \exists i \in (1, K), Jp^-(T) > Ttmin_i \Rightarrow \\
 & Jt = Jd + Jp^+(T) + \\
 & \max_{i=1}^{K-1} (|Ttmin_i - Jp^-(T)|) = \\
 & \max_{i=1}^{K-1} (Ttmax_i) + Jp^+(T) \\
 & + \max_{i=1}^{K-1} (|Ttmin_i - Jp^-(T)|) \quad . \quad (16)
 \end{aligned}$$

Оценим Jt для варианта со схемой коррекции времени распространения.

В этом случае содержимое поля данных широковещательного сообщения равно значению $Ttmin$. Значение этого поля учитывается при корректировке отсчета времени в устройстве, поэтому

$$Jd = \max_{i=1}^{K-1} (M_i * Ts). \quad (17)$$

А Jt соответственно можно оценить по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 Jt &= Jd + Jp^+(T) + Jp^-(T) = \\
 & \max_{i=1}^{K-1} (M_i * Ts) + Jp^+(T) + Jp^-(T). \quad (18)
 \end{aligned}$$

Второй предложенный механизм

Как отмечалось выше, в этой реализации контроллер локального времени расположен на сетевом уровне; соответственно, метки времени генерируются и анализируются на сетевом уровне. Счетчики локального времени также расположены на сетевом уровне. Задержка передачи широковещательного сообщения между ведущим и ведомым устройством включает время передачи через выходной порт, время передачи по физическому каналу и время передачи через входной порт. Отметка времени, помещенная в широковещательное сообщение, позволяет учесть все временные задержки между счетчиками времени в ведущем и ведомом устройствах.

Как отмечалось выше, время передачи широковещательного сообщения может варьироваться на величину, равную времени передачи одного символа, которое можно определить по формуле (12). Соответственно, время передачи широковещательного сообщения от ведущего

го к ведомому и от ведомого к ведущему устройствам может отличаться на величину T_s . Кроме того, в течение периода синхронизации значения счетчиков в ведущем и ведомом могут отличаться в зависимости от характеристик PLL. В результате отклонение отсчета времени между парой соседних устройств ведущий-ведомый ($Jt2$) можно определить по следующей формуле:

$$Jt2 = 2 * Ts + Jp^+(T) + Jp^-(T), \quad (19)$$

Синхронизация счетчиков времени в сетевых устройствах осуществляется в цепочках, в которых одно устройство настраивает следующее. Время синхронизации счетчиков времени во всех устройствах значительно меньше периода синхронизации. Соответственно, в процессе синхронизации отклонение счетчиков времени в парах устройств не велико, им можно пренебречь.

Тогда максимальное отклонение между счетчиками времени в источнике времени и остальных сетевых устройствах можно оценить по следующей формуле:

$$Jt = \max_{i=0}^{K-1} (Mi * 2 * Js) + Jp^+(T) + Jp^-(T). \quad (20)$$

Мы оценили зависимость Jt от количества транзитных маршрутизаторов, от периода синхронизации, от длины физических линий связи, от скорости передачи по физическим линиям для предложенных механизмов. На рис. 8 представлены графики зависимости Jt от количества транзитных маршрутизаторов при T

$= 1$ мс, при коротких физических каналах (задержка в них близка к 0), скорости передачи по физическим каналам 1,25 и 2,5 Гбит/с. График «маркеры времени» соответствует Tj , полученному с использованием первого механизма и с временными маркерами в качестве временных кодов. График с именем «Широковещательные сообщения» соответствует Tj , полученному с использованием первого механизма и с сообщениями Широковещательными сообщениями в качестве временных кодов. График «Широковещательные сообщения с коррекцией» соответствует Tj , полученному с использованием первого механизма, с широковещательными сообщениями в качестве кодов времени и с использованием предложенной схемы коррекции времени распространения. График с названием «IEEE 1588» соответствует Tj , полученному с использованием второго механизма.

На рис. 9 показаны аналогичные графики, полученные для длинных физических линий связи (задержка в линии связи составляет 500 нс, что соответствует задержке в оптическом кабеле длиной около 100 м).

Эти графики соответствуют скорости передачи по физическим каналам 1,25 Гбит/с и 2,5 Гбит/с. Тенденции, представленные на этих рисунках, остаются неизменными при более высоких скоростях передачи данных (3,125 Гбит/с и выше).

Как видно из этих графиков, значения Jt , полученные с использованием первого механизма без поправки на время распространения, существенно уступают значениям Jt , полученным с использованием второго механизма. Бо-

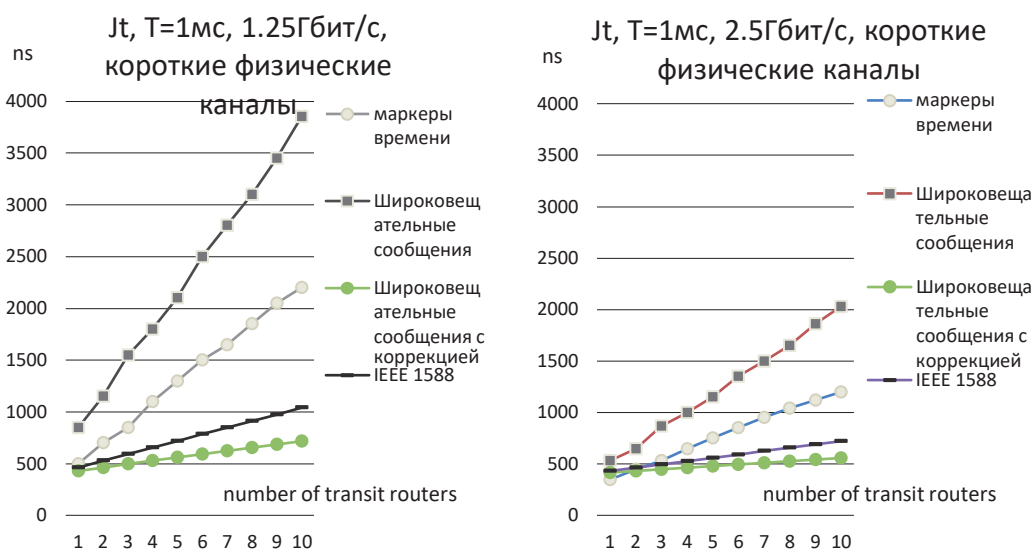


Рис. 8. Зависимость достижимой точности синхронизации от количества транзитных маршрутизаторов при использовании коротких линий связи в сети

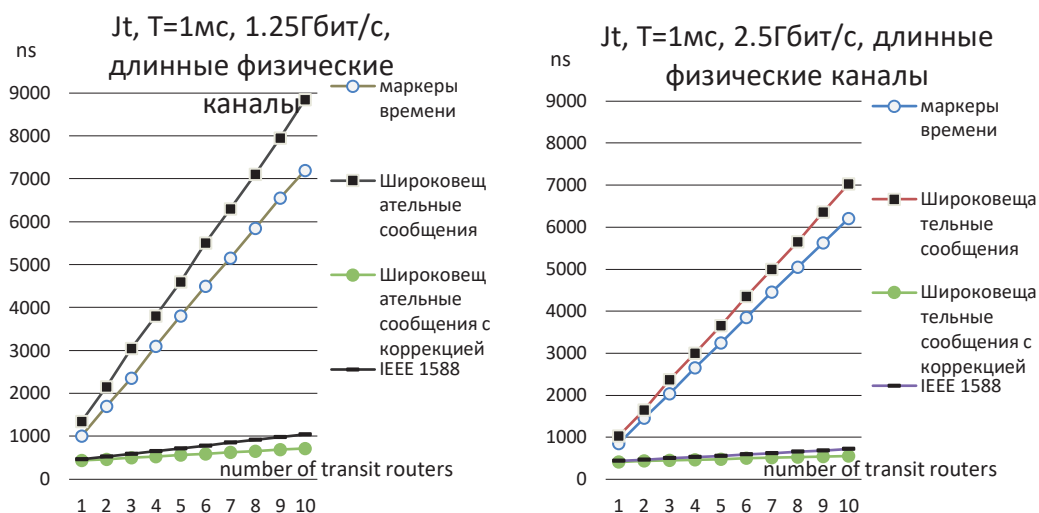


Рис. 9. Зависимость достижимой точности синхронизации от количества транзитных маршрутизаторов при использовании длинных линий связи в сети

лее того, с увеличением количества транзитных маршрутизаторов, с увеличением задержки линий связи Jt очень значительно увеличивается для первого механизма без коррекции времени распространения.

Как видно из этих графиков, точность синхронизации времени, полученная с использованием первого механизма с поправкой на время распространения, лучше, чем точность синхронизации времени, полученная с помощью второго механизма. При использовании первого механизма с коррекцией времени распространения во всех рассмотренных случаях достигается достижимая точность синхронизации времени менее 1 мкс.

Далее мы сравнили эти два механизма при разных значениях периода синхронизации (1, 2, 5 мс). Соответствующие графики показаны на рис. 10. Как видно из этих графиков, использование первого механизма с коррекцией времени распространения обеспечивает лучшую производительность, чем использование второго механизма. Причем для первого механизма значение Jt растет медленнее с увеличением количества маршрутизаторов. Это свидетельствует о предпочтении его использования в больших сетях.

Эти результаты были получены с использованием математических моделей. Далее было проведено имитационное моделирование. Для моделирования использовалась сетевая модель, которая включает RTL-модели маршрутизаторов и конечных узлов, разработанные на языке VHDL, и модели каналов связи с возможностью введения различной задержки передачи. Имитационное моделирование проводилось с ис-

пользованием инструментария Cadence Incisive 19.2. Значения достижимой точности синхронизации Jt , полученные с помощью моделирования, на 2–5% меньше расчетных (точность выше). Это произошло потому, что расчеты выполнялись для наихудших случаев, но во время моделирования не всегда происходили ситуации, соответствующие худшим случаям.

Далее оценим объем служебной информации, передаваемой при использовании предложенных механизмов. В целом его можно оценить по следующей формуле:

$$B = Kt * Lt, \quad (21)$$

где B – объем передаваемой служебной информации (кодов времени); Kt – количество кодов времени, передаваемых по сети в каждом цикле синхронизации; Lt – длина кода времени

При использовании всех вариантов первого механизма количество кодов времени, передаваемых по сети, одинаково. (Это зависит от графа подключений конкретной сети.) Обозначим его как $Kt1$. Обозначим Ltm – длину маркера времени, она равна 40 битам. Обозначим Ltb – длину широковещательного сообщения, $Ltb = 4 * Ltm$ [4]. Количество информации при использовании временных маркеров в качестве кодов времени можно оценить по следующей формуле:

$$Bm1 = Kt1 * Ltm. \quad (22)$$

Количество информации при использовании широковещательных сообщений в качестве кодов времени можно оценить по следующей формуле:

$$Bb1 = Kt1 * Ltb = Kt1 * 4 * Ltm = 4 * Bm1. \quad (23)$$

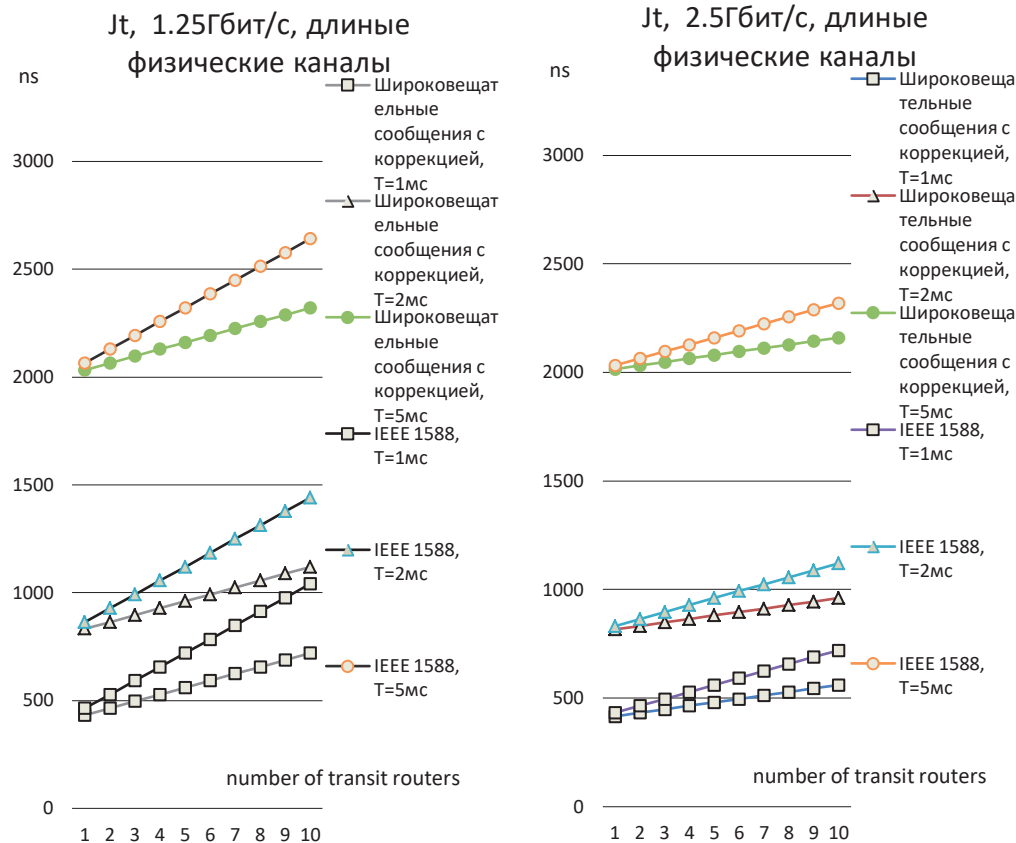


Рис. 10. Зависимость достижимой точности синхронизации от количества транзитных маршрутизаторов при использовании длинных линий связи в сети

Это в 4 раза больше, чем при использовании маркеров времени в качестве кодов времени.

При использовании второго механизма количество передаваемых кодов времени в 3 раза больше, чем при использовании первого механизма (при использовании второго механизма между парой соседних устройств передаются три кода времени, при использовании первого механизма – только один). Обозначим количество передаваемых кодов времени при использовании второго механизма $Kt2$. $Kt2 = 3 * Kt1$

Количество передаваемой информации при использовании второго механизма можно оценить по следующей формуле:

$$Bb2 = Kt2 * Ltb = 3 * Kt1 * Ltb = 3 * Bb1 = 12 * Bm1. (24)$$

Это в три раза больше, чем при использовании первого механизма с широковещательными сообщениями в качестве кодов времени, и в 12 раз больше, чем при использовании первого механизма с маркерами времени в качестве кодов времени.

Основные характеристики предлагаемых механизмов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение предложенных механизмов

	Достижимая точность синхронизации	Накладные расходы на передачу служебной информации
Механизм 1, маркеры времени	4(худший)	1(лучший)
Механизм 1, Широковещательные сообщения	3	2
Механизм 1, Широковещательные сообщения, коррекция времени распространения	1(лучший)	2
Механизм 2	2	3(худший)

В случаях, когда особенно важно минимизировать нагрузку на сеть вызываемую служебными сообщениями, предпочтительно использовать механизм 1 и маркеры времени в качестве кодов времени. Механизм 1 с коррекцией времени распространения предпочтительнее, когда требуется высокая точность синхронизации.

Использование второго механизма (который реализует механизм синхронизации, поддерживаемый другими стандартами) может быть целесообразным в гибридных сетях, в разных частях которых используются разные протоколы передачи данных.

Заключение

В статье рассматриваются существующие методы синхронизации времени для сетей с требованиями реального времени. Предлагаются механизмы синхронизации времени для сети на основе стандарта SpaceFibre, предлагается вариант их реализации. Этот вариант основан на динамически реконфигурируемом блоке контроллера локального времени. Для предложенных механизмов оценивается достижимая точность синхронизации времени, объем служебной информации, которая пересылается по сети.

Достижимая точность синхронизации не превышает 10 мкс для всех предложенных механизмов, что приемлемо для многих систем с требованиями жесткого реального времени.

Достижимая точность синхронизации для первого механизма с поправкой на время распространения и для второго механизма составляет менее 1 мкс. Этот результат лучше, чем Достижимая точность синхронизации в TTethernet и Fibre Channel.

Показано, что в разных сетях может быть целесообразно использовать разные механизмы синхронизации в зависимости от требований пользователя.

Реализация контроллера локального времени на основе реконфигурируемого автомата позволяет поддерживать в устройстве различные механизмы синхронизации. Соответственно, устройство можно использовать в разных сетях, с разными требованиями к синхронизации.

В будущем планируется разработать механизмы временной синхронизации с поддержкой устранения неисправностей в источнике времени.

Также мы планируем рассмотреть реализацию различных механизмов сетевого уровня, механизмов транспортного уровня, механизмов прикладного уровня (например, механизма планирования для гарантированного времени доставки данных) с использованием предложенных механизмов временной синхронизации. Планируется рассмотреть, как влияет метод корректировки времени на характеристики этих высокоуровневых механизмов.

Библиографический список

1. ESA. TN03: OSRA communication network specification. 2017. 66 p.
2. ESA. SAVOIR On-board Communication System Requirement Document (SAVOIR-GS-008). 2019. 68 p.
3. CCSDS. 853.0-M-1 SPACECRAFT ONBOARD INTERFACE SERVICES – SUBNETWORK SYNCHRONIZATION SERVICE. Magenta book, 2009. 23 p.
4. SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C. ESA-ESTEC. Noordwijk, The Netherlands. 15 May 2019. 233 p.
5. Mills D. L. RFC 958. Network Time Protocol (NTP). 1985. 13 p.
6. Wu B. J., Peloquin R. Synchronizing Device Clocks Using IEEE 1588 and Blackfin Embedded Processors. Analog Dialogue. 2009. 5 p.
7. IEEE Std.1588-2002. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems
8. IEEE Std.1588-2008. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems
9. Time-Triggered Ethernet. European Space Agency. 2020.
10. AS6802: Time-Triggered Ethernet.
11. TTethernet – A powerful Network Solution for All Purposes. TTEch. 2010. 15 p.
12. Fibre Channel – Switch Fabric 6 (FC-SW-6).
13. Catrine L. Fibre Channel Time Synchronization for Automated Testing IEEE AUTOTESTCON. 2018.
14. IEEE1588-based clock synchronization for embedded networked system with sRIO. International Conference on ICT Convergence (ICTC) / Jongmok Jeon, Donggil Kim, Dongik Lee. 2013.
15. ECSS-E-50-12C. SpaceWire – Links, nodes, routers and networks // European Cooperation for Space Standardization (ECSS). 2008. 31 July.
16. Suvorova E. An Approach to Dynamic Reconfigurable Transport Protocol Controller Unit Development. FRUCT 26. 2020. 8 p.
17. Understanding SYSCLK Jitter. Freescale Semiconductor. Document Number: AN4056. 2010. 10 p.
18. Lerner B., Lowenberger A. Understanding Jitter REquirements of PLL-Based Processors. Analog Devices. EE-261. 2005. 9 p.
19. MC926002. Quad 1.25 Gbaud Reduced Interface SerDes Reference Manual. Rev. 2. 2005. 92 p.
20. New Concept of Low-Noise and Low-Drift PLL Synthesizer Based on Composite Phase Detector / P. Gontarek, M. Zukocinski, K. Antoszkiewicz, F. Ludwig // 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON). 2014. 4 p.

УДК 004.7; 004.9

Doi: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-339-343

Е. А. Суворова*

кандидат технических наук, доцент

* Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ПРОБЛЕМА БЛОКИРОВКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТКАЗОВ И СБОЕВ В СНК

Процессы ускоренного старения, протекающие в кристаллах (chip), изготовленных по тонким проектным нормам по технологии ASIC, приводят к возникновению в них восстанавливаемых и невосстанавливаемых ошибок (сбоев и отказов) в процессе эксплуатации. Различные механизмы парирования отказов и сбоев используются для обеспечения корректного функционирования СНК. Накладные расходы (по площади и энергопотреблению) на реализацию этих механизмов различны. Различно и время, необходимое для обнаружения ошибки и восстановления корректной работы системы. Как правило, существуют жесткие ограничения на время обнаружения ошибки и восстановления корректной работы системы и на допустимые накладные расходы по площади и энергопотреблению. Особенно жесткими эти ограничения могут быть для систем аэрокосмического назначения, для систем с требованиями жесткого реального времени. Однако реализация механизмов, позволяющих быстро обнаружить ошибку, требует больших аппаратных затрат. В данной статье рассматривается путь борьбы с этим противоречием за счет блокировки последствий распространения отказов и сбоев в отдельных компонентах по всей системе. Это позволяет существенно сократить время восстановления корректной работы системы. В статье рассмотрены методы, позволяющие блокировать распространение последствий отказов и сбоев, приведен пример их применения.

Ключевые слова: парирование ошибок, системы-на-кристалле, реальное время, системы аэрокосмического назначения.

E. A. Suvorova*

PhD, Tech., Associate Professor

* St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE PROBLEM OF PREVENTING THE PROPAGATION OF THE CONSEQUENCES OF FAULTS IN THE SOC

Accelerated aging processes occurring in chips manufactured according to fine design rules using ASIC technology lead to the occurrence of recoverable and unrecoverable faults in them during operation. Various mechanisms for fault mitigation are used to ensure the correct functioning of the SoC. The overhead costs (area and energy consumption) for the implementation of these mechanisms are different. The time required to detect a fault and restore the correct operation of the system is also different. As a rule, there are strict limits on the time of fault detection and recovery of the correct operation of the system and on the allowable overhead costs (area and power consumption). These restrictions can be especially severe for aerospace systems, for systems with hard real time requirements. However, the implementation of mechanisms of quickly detecting of faults lead essential hardware overheads. This paper discusses a way to eliminate this contradiction by preventing the consequences of the propagation of faults in individual components throughout the system. This approach can significantly reduce the time to restore the correct operation of the system. The paper discusses methods that allow preventing the propagation of the consequences of faults, an example of their application is given.

Keywords: fault mitigation, systems-on-chip, real time, systems for aerospace equipment.

Введение

Для изготовления современных СНК часто используются тонкие проектные нормы – 90, 65 нм и тоньше. Для этих проектных норм эффекты диффузии – взаимопроникновения материалов проводника и диэлектрика в процессе эксплуатации СНК в сочетании с последствиями вариации технологического процесса приводят к так называемому ускоренному старению. В результате диффузии исходные формы элемен-

тов рисунка схемы могут настолько существенно искажаться, что приводят к некорректному функционированию логических вентилей и некорректной передаче сигналов по линиям связи. В ходе эксплуатации СНК начинают происходить сбои и отказы [1].

Из-за этого проблема парирования сбоев и отказов в ходе эксплуатации СНК является очень важной. В настоящее время существуют различные механизмы парирования сбоев и отказов [1, 2].

В общем случае механизмы парирования сбоев и отказов включают в себя механизмы обнаружения ошибки (под ошибкой понимается проявление отказа или сбоя), механизмы локализации ошибки (предотвращения ее распространения по системе в целом), механизмы коррекции ошибки, замещения блока, в котором возникла ошибка на резервный блок, либо восстановления корректного функционирования блока, в котором возник сбой или отказ, либо исключения блока, в котором возник отказ из дальнейшего функционирования (в этом случае система продолжает работать, но с частичным сокращением функциональности). Возможны различные варианты реализации данных механизмов. Каждый механизм может быть реализован отдельно либо в сочетании с другими механизмами [2, 3].

При выборе того или иного набора механизмов, варианта их реализации необходимо учитывать какое количество сбоев и отказов требуется парировать, их типы, допустима ли частичная деградация набора выполняемых функций. Также требуется учитывать накладные расходы на реализацию механизмов парирования (по площади, по энергопотреблению), степень влияния ошибки на работу системы в целом, допустимое время обнаружения ошибки и время восстановления корректной работы системы [2, 3].

Для многих систем аэрокосмического назначения существуют жесткие ограничения по площади по энергопотреблению. Поэтому необходимо выбирать механизмы, использование которых не приводит к нарушению этих ограничений.

Также для большинства систем аэрокосмического назначения существуют требования реального времени (во многих случаях – жесткого реального времени). Вследствие этого, время обнаружения сбоя, отказа и время восстановления корректной работы системы после его возникновения, как правило, жестко ограничено.

Однако реализация большинства механизмов, позволяющих быстро обнаружить ошибку, произошедшую в результате возникновения сбоя или отказа требует существенных аппаратных затрат, которые превышают существующие ограничения по допустимой площади и энергопотреблению.

Если ошибку, возникшую в одном из блоков, не удастся обнаружить быстро, последствия ее возникновения могут повлиять на правильность функционирования блоков, взаимодействующих с блоком, в котором произошла ошибка. Причем распространение последствий ошибки по системе может происходить доволь-

но быстро. В результате большая часть СнК или даже вся СнК может функционировать не корректно [2, 3]. В результате время восстановления корректной работы СнК после возникновения сбоя или отказа в одном из компонентов может быть довольно велико.

Для того, чтобы сократить время восстановления, может использоваться блокировка распространения последствий возникновения сбоя или отказа в одном из компонентов по системе. В данной статье мы рассматриваем, как может осуществляться такая блокировка.

Обзор существующих механизмов парирования отказов и сбоев

Механизмы парирования отказов и сбоев могут встраиваться на разных уровнях гранулярности проекта, начиная от уровня библиотечных компонентов и заканчивая крупными СФ-блоками (ядра микропроцессоров, микроконтроллеров и др.) [1]. На каждом из этих уровней могут поддерживаться разные механизмы, разные варианты их реализации. Так на уровне библиотечных компонентов может использоваться дублирование компонента с различной кратностью (например, троирование) в сочетании с мажоритарной схемой выбора результата. Достоинством такой схемы является очень короткое время обнаружения ошибки и исправления ошибки. Распространение последствий сбоя, отказа по системе исключается (если сама мажоритарная схема при этом функционирует корректно).

Такая схема позволяет выявлять и корректировать однократные ошибки типа SEU. Однако она, зачастую не позволяет парировать ошибки типа MCU, в случае если ошибка затрагивает два компонента, входящие в одну мажоритарную схему. Для тонких проектных норм, начиная с 65 нм MCU достаточно распространены [1], поэтому дублирование на уровне библиотечных компонентов во многих случаях оказывается не подходящим. Эта схема не подходит в случаях, когда допустимо частичное сокращение функциональности. Еще одним существенным недостатком этой схемы являются большие накладные расходы, т.к. площадь увеличивается пропорционально кратности резервирования.

Устранение этих недостатков, по крайней мере, частичное, возможно при реализации механизмов парирования ошибок на уровне более крупных СФ-блоков (включающих в себя десятки и более библиотечных компонентов). За счет того, что блоки более крупные вероятность влияния MCU на несколько блоков становится очень

близка к 0 [1]. Во многих проектах используются группы одинаковых блоков (например, группа из нескольких одинаковых АЛУ, группа из нескольких одинаковых микроконтроллеров). Для сокращения площади в таких случаях используется не кратное резервирование, а скользящий резерв. В отсутствие резерва отключение блоков, в которых возникли ошибки, позволяет системе продолжить функционирование с частичным сокращением функциональности.

Вследствие этого в настоящее время довольно часто используется резервирование на уровне СФ-блоков средней и крупной гранулярности [2, 3].

Оценка влияния сбоев и отказов на функционирование СФ-блоков

Внутри СФ-блоков могут происходить различные сбои и отказы. Они могут проявляться в форме различных ошибок, наблюдаемых на выходах этих блоков, по-разному сказывающихся на работе системы, в составе которой они функционируют. Необходимо иметь возможность оценивать проявления последствий сбоев и отказов внешних интерфейсах СФ-блока, определять к возникновению каких ошибок на интерфейсах они могут приводить. Это позволит формировать схемы блокировки таких ошибок.

Для того, чтобы сформировать модель возможных сбоев и отказов (весь перечень возможных сбоев и отказов) и связанных с ними проявлений ошибок на уровне СФ-блока, как правило, рассматривается список связей, полученный в результате физического синтеза и необходимо учитывать информацию о размещении компонентов и линий связи, полученную в процессе физического синтеза. Даже для достаточно небольшого СФ-блока, например, контроллера прямого доступа к памяти список связей может включать в себя несколько сотен библиотечных элементов. Списки связей более сложных блоков могут включать в себя несколько тысяч или десятков тысяч библиотечных элементов. Анализ такого списка связей, процесс формирования моделей всех возможных ошибок для него является очень трудоемким, занимающим много времени. В зависимости от размера СФ-блока он может занимать несколько недель или даже месяцев. Это существенно сказывается на времени разработки системы в целом.

Из-за того, что в современных САПР используются эвристические алгоритмы, при повторном физическом синтезе полученный список связей может несколько отличаться от исходного даже в том случае, когда модель на уровне

не регистровых передач не менялась. Необходимо отметить, что физический синтез может выполняться многократно в ходе работы над проектом. Это может происходить из-за того, что не сразу удастся достичь необходимые пользователю характеристики, также в процессе работы над проектом могут выявляться логические ошибки, несоответствия между моделью уровня RTL и списком связей, полученным в результате логического синтеза. Для очередного списка связей формирование модели сбоев и отказов приходится выполнять заново. Что еще больше увеличивает время разработки системы в целом.

Однако во многих случаях время разработки можно существенно сократить, если использовать менее детальную модель ошибок, построенную в привязке к модели уровня регистровых передач и ее интерфейсу с внешним миром.

При формировании такой модели выполняется анализ внешнего интерфейса, возможных сценариев ошибочного поведения.

На первом этапе определяются множество ошибок, которое может происходить в результате искажения значений на отдельных линиях, входящих в состав интерфейса. Далее на втором этапе выполняется интерпретация этого набора ошибок в соответствии с логикой работы интерфейса. Если через интерфейс передаются объекты данных, для передачи которых требуется более одного такта, то выполняется третий этап, в рамках которого определяется интерпретация ошибок по отношению к объектам данных целиком.

Рассмотрим это на примере синхронного интерфейса передачи данных, включающего в себя сигнал тактирования, линию выходных данных Data_out (9 разрядов), выходной сигнал действительности данных Valid_out и входной сигнал готовности принять данные Ready_out. По данному интерфейсу передаются пакеты данных. Если очередной байт данных не является концом пакета, то он передается по Data_out(7..0), Data_out(8)=0. Если очередной байт данных является концом пакета, то Data_out(8)=1, Data_out(7..0)=0x00 – соответствует признаку успешного конца пакета, Data_out(7..0)=0x01 – соответствует признаку аварийного конца пакета (остальные значения Data_out(7..0) являются недопустимыми, их возникновение свидетельствует о том, что в ходе функционирования блока произошел сбой или отказ).

На первом этапе мы определяем, что в результате сбоя или отказа внутри блока, которому принадлежит данный интерфейс на каждом из раз-

рядов `Data_out`, `valid_out` может произойти ошибка – значение будет инверсным относительно ожидаемого при правильной работе блока. Также в результате сбоя или отказа значение входа `ready_in` может восприниматься как инверсное по отношению к ожидаемому правильному.

На втором этапе мы интерпретируем эти ошибки.

1. Если происходит ошибка на `Data_out` – передаваемое слово данных будет искажено.

2. Если происходит ошибка на `Valid_out`, вместо значения 1 на выходе 0, то может быть потеряно одно передаваемое слово. Если вместо значения 0 на выходе 1, то может быть передано одно слово, которое не должно быть передано («лишнее слово»)

3. Если происходит ошибка на `Ready_in`, вместо значения 1 значение 0, то будет передано одно «лишнее» слово. Если вместо значения 0 значение 1, то одно слово может быть потеряно при передаче.

Поскольку в нашем примере объект данных – пакет может передаваться за несколько тактов, выполним третий этап.

1. Если произошло искажение слова данных, но при этом значение разряда `Data_out(8)` не изменилось, не произошло нарушения границ объектов данных. Если произошла ошибка в `Data_out(8)`, то это приводит к нарушениям границ объектов данных. Утрата конца очередного пакета приводит к слипанию двух подряд идущих пакетов. Добавление в результате ошибки конца пакета приведет к появлению «нового» пакета

2. Ошибки, в результате которых на `Valid_out` окажется 1 вместо 0, и на `ready_in` окажется 0 вместо 1 приведут к передаче лишнего слова. Если это было слово данных, то произойдет искажение содержимого пакета. Если это был конец пакета, то он продублируется. (Необходимо отметить, что дублирование конца пакета, как правило, не приводит к ошибкам в последующих блоках).

3. Ошибки, в результате которых на `Valid_out` окажется 0 вместо 1, и на `ready_in` окажется 1 вместо 0 приведут к потере слова. Если это было слово данных, то в результате поле данных пакета будет искажено. Если это был конец пакета, то произойдет слипание подряд идущих пакетов.

Если рассмотренные ошибки произошли в результате сбоев, то они будут выражаться в однократных искажениях, потере, дублировании отдельных слов. Если они произошли в результате отказов, то в пределе может возникнуть ситуация постоянной передачи слова (*babbling idiot*) или отсутствия передачи.

Блокировка распространения ошибки в следующие СФ-блоки системы

Если в СФ-блоке произойдет сбой или отказ, например, связанный с искажением обрабатываемого пакета, слипанием пакетов, появлением «нового» пакета, это может привести к некорректности результатов функционирования следующих блоков. В данном разделе мы рассмотрим, за счет чего этого можно избежать.

Поскольку реализация механизмов блокировки также связана с аппаратными затратами, первое, что необходимо сделать, это определить степень критичности возможных ошибок для системы (для функционирования СФ-блоков, связанных с рассматриваемым). Применительно к примеру, который мы начали рассматривать в предыдущем разделе, ошибку дублирования конца пакета можно считать не критичной.

Механизмы блокировки могут быть основаны на наличии неких правил, позволяющих отслеживать корректность поведения СФ-блока. Например, может быть известно, что в системе размер объекта данных должен находиться в некотором диапазоне допустимых значений. Если на интерфейсе наблюдается объект данных, не удовлетворяющий этому условию, то произошла ошибка. Применительно к рассматриваемому примеру может быть ограничена максимально допустимая длина пакета. Контроль длины пакета может позволить отследить ситуацию слипания пакетов и ситуацию “*babbling idiot*”. Вторая из них («*babbling idiot*») особенно критична для работы системы, так как появление бесконечно длинного пакета может полностью заблокировать возможность корректной обработки других объектов данных.

В качестве правил часто используются таймауты, например, таймаут между передачами отдельных слов, принадлежащих объекту данных, таймаут передачи объекта данных полностью, таймаут между объектами данных.

Применительно к нашему примеру таймауты могут позволять отследить ошибки, при которых прекращается передача объекта данных.

Однако подобные правила не позволяют отследить искажение отдельных слов. Если подобного рода ошибки критичны для функционирования системы, их также необходимо отслеживать. (Эти ошибки будут не критичны, если объект данных при передаче снабжается контрольной суммой, которая проверяется в следующем СФ-блоке перед началом его обработки. Однако данный подход не приемлем, если выполняется обработка данных на лету).

Для отслеживания искажения передаваемых слов данных может использоваться кодирование (например, биты паритета, коды Хемминга и др.). Как правило, их реализация не связана с большими накладными расходами.

Рассмотрим, как можно отслеживать ошибки типа появления «лишнего» слова или «пропадания» слова в результате сбоев и отказов, приводящих к искажению значений на линиях управления (в нашем примере, на Valid_out и Ready_in). Для отслеживания последовательности слов можно использовать кодирование (например, коды Хемминга), охватывающие не одно, а несколько подряд идущих слов. Можно также использовать нумерацию слов – включить в интерфейс дополнительный набор линий, по которому передавать циклически инкрементирующийся номер слова. Нумерацию можно осуществлять с использованием кодирования Грея, чтобы обеспечить выявление ошибок на линиях номера. Второй вариант по нашим оценкам представляется более предпочтительным.

Необходимо отметить, что никакой из предложенных механизмов отслеживания ошибок, равно как и их сочетание, не дает гарантии полного исключения распространения ошибки по системе, однако позволяет существенно снизить вероятность распространения.

Заключение

В статье рассмотрены проблемы парирования сбоев и отказов в СнК, изготавливаемых по тонким проектным нормам, рассмотрены существующие механизмы парирования сбоев и отказов, особенности их применения для систем аэрокосмического назначения, проблемы, возникающие при их использовании. Рассмотрены механизмы блокирования распространения сбоев и отказов как средство сокращения времени восстановления штатной работы системы. Показаны примеры их применения. В дальнейшем планируется выполнить более детальную оценку накладных расходов на их реализацию, систематизировать связи между выбираемыми для использования на интерфейсах механизмами и механизмами, используемыми внутри блоков.

Библиографический список

1. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). 2017.
2. Cota E., de Moraes Amory A., Lubaszewski M. S. Reliability, Availability and Serviceability of Networks-on-Chip. Springer, 2012. 209 p.
3. Jafri S., Guang L., Hemani A. et al. Energy-aware fault-tolerant network-on-chips for addressing multiple traffic classes // Microprocessors and Microsystems. 2013. Vol. 37. Is. 8. 811–822.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Авдеев Владимир Алексеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – технические средства навигации и управления движением.
E-mail: apex7781@mail.ru.

Андронов Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы, транспортное моделирование, прогнозирование, моделирование управления в цепях поставок.
E-mail: andronov_00@mail.ru.

Алексеева Кристина Игоревна

магистрант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – проектирование космических систем и космических аппаратов.
E-mail: Alexeeva328@mail.ru.

Барилко Михаил Сергеевич

главный специалист, АО «Производственное объединение „Уральский оптико-механический завод им. Э. С. Ямалова“, филиал «Урал-ГОИ», Санкт-Петербург. Область научных интересов – моделирование сверхширокополосных антенн и микрополосковых элементов.
E-mail: inname@yandex.ru.

Беляев Алексей Андреевич

магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – моделирование систем автоматического управления БПЛА.
E-mail: belji98@mail.ru.

Бирюков Борис Леонтьевич

старший преподаватель кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – анализ и синтез измерительных и управляющих систем.
E-mail: collega.k@yandex.ru.

Бутомо Константин Михайлович

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэро-

космического приборостроения. Область научных интересов – технология транспортных процессов.

E-mail: kbutomo@yandex.ru.

Будюкин Алексей Митрофанович

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I. Область научных интересов – конструкция и ремонт рельсового и автомобильного подвижного состава.

E-mail: tehmet_pgups@mail.ru.

Богатов Никита Владимирович

магистрант кафедры системного анализа и логистики, инженер лаборатории беспилотных авиационных систем Инженерной школы ГУАП, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – беспилотные авиационные системы.

E-mail: nikita.bogatow@gmail.com.

Бурлуцкий Сергей Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – авионика, авиационные приборы и системы.

E-mail: Sergey_burluckiy@mail.ru.

Бродский Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – навигация, управление движением.

E-mail: brodsky@aanet.ru.

Богданова Анастасия Вячеславовна

магистрант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – производственное планирование, разработка приложения.

E-mail: Nastya_b.1997@mail.ru.

Воропаева Дарья Александровна

магистрант, инженер кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – приборостроение, моделирование, МЭМС-технологии.

E-mail: daria7Vo@yandex.ru.

Ветрова Дарья Александровна

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – доставка оборудования в районы крайнего севера, транспортно-технологические схемы доставки.
E-mail: dasha.vetrov@mail.ru.

Вознесенский Евгений Александрович

магистрант кафедры системного анализа и логистики, лаборант лаборатории беспилотных авиационных систем Инженерной школы ГУАП, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – беспилотные авиационные системы.
E-mail: voznensenskiy.evgeniy@mail.ru.

Василянски Вячеслав Иванович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «КБ „Арсенал“ им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург. Область научных интересов – вопросы базирования и боевого применения авиации с кораблей и судов.
E-mail: was2017-41@yandex.ru.

Воробьев Александр Алфеевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии металлов, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I. Область научных интересов – конструкция и ремонт рельсового и автомобильного подвижного состава.
E-mail: tehmet_pgups@mail.ru.

Винарь Полина Олеговна

инженер кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – теория помехоустойчивого кодирования.
E-mail: polinavinar@yandex.ru.

Виноградов Алексей Юрьевич

инженер института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – электроника, протоколы канального уровня, сети на кристалле, FPGA, ASIC.
E-mail: alexey.vinogradov@guap.ru.

Григорьев Александр Павлович

начальник проектно-конструкторского сектора, АО «КБ „Арсенал“ им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург. Область научных интересов – системы навигации и управления движением, алгоритмическое обеспечение.
E-mail: alexgrig-1986@mail.ru.

Гидроец Михаил Олегович

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – моделирование, анализ, принятие управленческих решений.
E-mail: feston25@yandex.ru.

Гришанова Лариса Иосифовна

кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – информационное обеспечение транспортных процессов, базы данных.
E-mail: l_grish@mail.ru.

Голосий Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – авионика, авиационные приборы и системы.
E-mail: a.s.golosiy@mail.ru.

Григорьев Александр Павлович

старший преподаватель кафедра аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – авиационные приборы и системы.
E-mail: alexgrig-1986@mail.ru.

Добровольская Ангелина Александровна

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – пассажирские перевозки, имитационное моделирование сложных технических систем.
E-mail: angd999@gmail.com.

Дуркин Роман Прович

инженер-конструктор 2-й категории, АО «КБ „Арсенал“ им. М. В. Фрунзе», Санкт-Петербург. Область научных интересов – авиационные приборы, датчиково-преобразующая аппаратура, аналоговая и цифровая схемотехника, оптико-электронные приборы, беспроводные технологии.
E-mail: romandurkin@yandex.ru.

Езерский Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – авионика, авиационные приборы и системы.
E-mail: vezerskiy@nii-ps.ru.

Зайкин Дмитрий Викторович

магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – моделирование и исследование работы систем космических аппаратов.
E-mail: okyyyn@gmail.com.

Иванов Николай Викторович

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – имитационное моделирование систем массового обслуживания.
E-mail: ivanov05031998@yandex.ru.

Иванов Дмитрий Валерьевич

магистрант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – протоколы передачи данных, разработка программных приложений.
E-mail: dmitryivanov199@mail.ru.

Иванов Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – неоднородные вычисления, модели вычислений.
E-mail: vladimir.ivanov@ieee.org.

Коврегин Валерий Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – навигация, радиолокация, дальнометрия.
E-mail: kovregin@mail.ru.

Коврегина Галина Михайловна

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – навигация, радиолокация, дальнометрия.
E-mail: g_kovregina@mail.ru.

Кузнецов Алексей Андреевич

ассистент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – линейная фильтрация, спектральный анализ, максимальная ошибка управления.
E-mail: alexkuz2008@rambler.ru.

Кондратенко Владимир Григорьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I. Область научных интересов – конструкция и ремонт рельсового и автомобильного подвижного состава.
E-mail: tehmet_pgups@mail.ru.

Кляпко Владислав Андреевич

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – логистика, технологии транспортных процессов, моделирование транспортных процессов.
E-mail: klyapko.rv@yandex.ru.

Кропачев Тихон Витальевич

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: Tixon090@yandex.ru.

Крылова Елизавета Игоревна

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – технология транспортных процессов, интеллектуальные транспортные системы.
E-mail: elizabet704@mail.ru.

Костин Антон Сергеевич

аспирант кафедры системного анализа и логистики, заведующий лабораторией беспилотных авиационных систем Инженерной школы ГУАП, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – беспилотные авиационные системы.
E-mail: anton13258@mail.ru.

Кунтуров Андрей Леонидович

кандидат военных наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – авионика, авиационные приборы и системы.
E-mail: kunturov@rambler.ru.

Кунтуров Сергей Андреевич

ассистент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – авионика, робототехнические системы и комплексы военного назначения.
E-mail: kunturov@rambler.ru.

Кошкарров Александр Сергеевич

магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – системы управления движением и навигация. E-mail: egor_alex_korolev@mail.ru.

Колисниченко Анастасия Дмитриевна

магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – системы автоматического управления, навигация и движение. E-mail: anastasyakolesnichenko@mail.ru.

Кузьмичев Юрий Алексеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов, схемотехника электронных устройств, системы ориентации и управления космическими аппаратами, автоматизированные системы навигации и управления. E-mail: y.kuzmichev63@mail.ru.

Ковалёв Сергей Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – теория помехоустойчивого кодирования. E-mail: skovalev52@gmail.com.

Карандашев Александр Александрович

инженер Института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – методы оптимизации, бортовые сети, беступиковая маршрутизация. E-mail: aleksandr.karandashev@guap.ru.

Королев Егор Александрович

магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – системы управления движением и навигация. E-mail: egor_alex_korolev@mail.ru.

Лабутина Екатерина Сергеевна

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – разработка комплекса мероприятий по защите от контрафактных комплектующих на производственном предприятии. E-mail: labutina00@mail.ru.

Ларионов Никита Алексеевич

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – технология транспортных процессов. E-mail: laronov_nik@mail.ru.

Лебедева Маргарита Сергеевна

магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – системы автоматического управления, системы гироскопической стабилизации, инерциальные сенсоры параметров движения основания. E-mail: lebedevamargo@rambler.ru.

Лезова Ирина Евгеньевна

ассистент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – физика полимеров и нанокompозитов, исследование физико-механических свойств, как самих материалов, так и сочетаний с другими материалами. E-mail: irina_gospodchikova@mail.ru.

Лесонен Олеся Сергеевна

инженер-конструктор 3-й категории, АО «Навигатор», Санкт-Петербург. Область научных интересов – изучение спутниковой навигации и посадки, БПЛА, разработка комплексов бортового оборудования. E-mail: lesonen.olesya@yandex.ru

Луцив Вадим Ростиславович

доктор технических наук, профессор кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – компьютерное зрение, искусственные нейронные сети. E-mail: vluciv@mail.ru.

Малаханов Роман Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – дискретные информационно-измерительные системы, микроконтроллеры. E-mail: malahanov@mail.ru.

Мамедова Лала Сергеевна

инженер ОАО «Радиоавионика», Санкт-Петербург. Область научных интересов – моделирование, приборостроение, игровой подход, автоматические летательные аппараты. E-mail: lal.mamedova2011@gmail.com.

Майоров Николай Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – теория транспортных процессов и систем, интеллектуальные транспортные системы, прогнозирование развития транспортных систем.

E-mail: nnm@guap.ru.

Маликова Татьяна Егоровна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теории и устройства судна, Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток. Область научных интересов – технология транспортных процессов.

E-mail: tanmalik@mail.ru.

Мурзаев Алексей Сергеевич

магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интегрированные системы навигации, радиолокация и радионавигация.

E-mail: alexey.mur97@yandex.ru.

Небылов Александр Владимирович

доктор технических наук, профессор, директор Международного института передовых аэрокосмических технологий, заведующий кафедрой аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – управление движением, навигация, аэрокосмические аппараты, экранопланы, датчики.

E-mail: nebylov@aanet.ru.

Оськина Екатерина Дмитриевна

магистрант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – компьютерное зрение, мобильная медицина.

E-mail: kathxos@gmail.com.

Овчинникова Наталья Анатольевна

кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации.

E-mail: brodsky@aanet.ru.

Оленев Валентин Леонидович

кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – моделирование, встроенные системы.

E-mail: valentin.olenev@guap.ru.

Панферов Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальная оптимизация и приложения, математическая оптимизация, производительность, управление относительным движением, распределенные системы управления.

E-mail: panferov@aanet.ru.

Перепеченов Александр Маркович

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I. Область научных интересов – конструкция и ремонт рельсового и автомобильного подвижного состава.

E-mail: tehmet_pgups@mail.ru.

Пряничникова Маргарита Олеговна

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – технология транспортных процессов.

E-mail: zigrainec@gmail.com.

Пляскина Алина Андреевна

аспирант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – законы управления летательного аппарата, вертолетостроение.

E-mail: kunturov@rambler.ru.

Павлов Антон Михайлович

старший преподаватель кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – летательные аппараты, динамика полета.

E-mail: Sa807@bk.ru.

Пецевич Максим Денисович

магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – моделирование и исследование работы систем космических аппаратов.

E-mail: petsevichmaxim@yandex.ru.

Пузий Екатерина Андреевна

аспирант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – системы управления движением и навигация.

E-mail: ekatreina.puziy@yandex.ru.

Петров Алексей Юрьевич

магистрант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – моделирование, сетевые технологии.

E-mail: palexeq1998@yandex.ru.

Руцки Дмитрий Михайлович

магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – безопасность полета, человеческий фактор, нейронные сети.

E-mail: rutsik3@yandex.ru.

Радочинская Анжела Жановна

аспирант кафедры управления морским транспортом, Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток. Область научных интересов – технология транспортных процессов.

E-mail: annanyan@yandex.ru.

Рождественская Ксения Николаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – локальные сети аэрокосмического назначения, администрирование и мониторинг сетей, PnP.

E-mail: ksenia.khramenkova@guap.ru.

Слободчиков Николай Александрович

кандидат военных наук, профессор кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – логистика, технологии транспортных процессов, моделирование транспортных процессов.

E-mail: kola_slob@mail.ru.

Скорина Сергей Феодосиевич

кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – системы автоматического управления, теория надежности, инерциальные сенсоры параметров движения основания.

E-mail: ssf@aanet.ru.

Семенова Валентина Павловна

лаборант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – Системы управления движением и навигация.

E-mail: vsvally@mail.ru.

Слюсаренко Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – математическое моделирование.

E-mail: Sas_2000@mail.ru.

Суворова Елена Александровна

кандидат технических наук, доцент, заведующая лабораторией института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – системы и сети на кристалле, динамически реконфигурируемые системы, локальные сети аэрокосмического назначения, парирование ошибок в сетях.

E-mail: wildcat15@yandex.ru.

Соколова Анна Александровна

магистрант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – разработка программного обеспечения для устроенных систем.

E-mail: any1281@yandex.ru.

Сыщиков Алексей Юрьевич

заведующий лабораторией института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – параллельное программирование, встраиваемые вычислительные сети.

E-mail: alexey.syschikov@guap.ru.

Тарасенков Андрей Александрович

старший преподаватель кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – приборостроение, радиотехника, обработка сигналов.

E-mail: Wagir@mail.ru.

Тимофеев Константин Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальные системы авионики, нейронные сети.

E-mail: balteco@mail.ru.

Таратун Екатерина Александровна

ассистент кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы, транспортное моделирование, прогнозирование, моделирование управления в цепях поставок.

E-mail: losekaterina@yandex.ru.

Титов Илья Сергеевич

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы.

E-mail: llttv97@mail.ru.

Тарасова Евгения Константиновна

магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – моделирование работы и исследование устройства средств выведения.

E-mail: jesa@mail.ru.

Тимофеев Вадим Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – летательные аппараты, динамика полета.

E-mail: timofeev-vi@yandex.ru.

Уголков Сергей Вячеславович

кандидат военных наук, доцент кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – технология транспортных процессов, интеллектуальные транспортные системы.

E-mail: uglkvserg@mail.ru.

Федотов Дмитрий Олегович

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы.

E-mail: Fioletto93@mail.ru.

Фетисов Владимир Андреевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление движением, навигация, технология транспортных процессов, системный анализ и управление, теория принятия решения при неопределенности.

E-mail: fet1vlad@yandex.ru.

Фадеева Елена Николаевна

магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – оптика, оптико-электронные приборы, оптические покрытия.

E-mail: elena1808f@yandex.ru.

Чижов Виталий Сергеевич

магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – искусственный интеллект, приборостроение, компьютерное зрение, обработка изображений.

E-mail: unclwex@icloud.com.

Шимков Виктор Дмитриевич

инженер АО НПО «Импульс», Санкт-Петербург. Область научных интересов – приборостроение, программирование, голосовое управление.

E-mail: vitya_shimkov@mail.ru.

Щекина Кристина Владимировна

магистрант кафедры системного анализа и логистики, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – схема обращения отходов.

E-mail: Krika444@mail.ru.

Янченко Анна Анатольевна

кандидат технических наук, доцент кафедры менеджмента и логистики, Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток. Область научных интересов – технология транспортных процессов.

E-mail: annanyan@yandex.ru.

Яшагина Виктория Валерьевна

инженер кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, магистрант, инженер Международного института передовых космических технологий, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Область научных интересов – аэродинамика, моделирование, приборостроение.

E-mail: shiki.tnc81@gmail.com.

СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО.....	3
АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ.....	5
<i>Барилко М. С., Тарасенков А. А.</i> РАДИОВОЛНОВЫЙ ДАТЧИК ДЛЯ ОХРАННЫХ СИСТЕМ	5
<i>Беляев А. А.</i> К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ.....	9
<i>Бирюков Б. Л.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИНЕАРИЗАЦИИ УРАВНЕНИЙ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ.....	13
<i>Воропаева Д. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ.....	17
<i>Григорьев А. П., Яшагина В. В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИРИЖАБЛЯ.....	22
<i>Коврегин В. Н., Коврегина Г. М.</i> АДАПТИВНО-РОБАСТНЫЕ МЕТОДЫ РАДИОЛОКАЦИОННО-ИНЕРЦИАЛЬНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЯХ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО ЛЧМ-ИЗЛУЧЕНИЯ.....	26
<i>Коврегин В. Н., Коврегина Г. М.</i> ИНВАРИАНТНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАВИСШИХ, МАЛО- И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И НАВИГАЦИИ ПРИ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОМ ЛЧМ-ИЗЛУЧЕНИИ И МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЯХ	33
<i>Кузнецов А. А., Небылов А. В.</i> ОБЗОР ЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОЙ ОШИБКИ УПРАВЛЕНИЯ	41
<i>Малаханов Р. Н., Чижов В. С.</i> ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В КЛАССИФИКАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НИЗКОГО КАЧЕСТВА.....	44
<i>Малаханов Р. Н., Шимков В. Д.</i> ГОЛОСОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВИАЦИОННЫМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ИНДИКАТОРОМ	48
<i>Мамедова Л. С., Небылов А. В., Панферов А. И.</i> ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВСТРЕЧИ.....	51
<i>Мурзаев А. С., Коврегин В. Н.</i> ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ КАНАЛ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ФОНЕ ЗАДАЧ РАДАРА ПРИ ОБЗОРЕ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА.....	56
<i>Руцки Д. М., Тимофеев К. Н.</i> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА	60
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ЛОГИСТИКА.....	66
<i>Андронов С. А.</i> СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА В АНАЛИТИЧЕСКОЙ LOW-CODE-ПЛАТФОРМЕ LOGINOM	66
<i>Бутомо К. М., Уголков С. В.</i> СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ.....	76
<i>Ветрова Д. А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОТУРБИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ.....	81
<i>Воробьев А. А., Будюкин А. М., Кондратенко В. Г., Перепеченов А. М.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ПОЕЗДОВ НА ОТЕЧЕСТВЕННОМ РЕЛЬСОВОМ ТРАНСПОРТЕ.....	86
<i>Гидроец М. О., Гришанова Л. И.</i> АНАЛИЗ РЫНКА ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ В РОССИИ	92
<i>Добровольская А. А., Фетисов В. А.</i> ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ УЛИЧНО- ДОРОЖНОЙ СЕТИ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	95

Иванов Н. В. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКОВ	100
Кляпко В. А., Слободчиков Н. А. ВНЕДРЕНИЕ СКЛАДНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ «4FOLD» В ПЕРЕВОЗОЧНЫЙ ПРОЦЕСС.....	103
Кропачев Т. В., Уголков С. В. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ.....	107
Крылова Е. И. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ. «УМНЫЙ» СВЕТОФОР, «УМНЫЙ» ПЕРЕКРЕСТОК.....	115
Лабутина Е. С. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЗАЩИТЕ ОТ КОНТРАФАКТНЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ.....	119
Ларионов Н. А., Уголков С. В. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ МУЗЕЙНО-ВЫСТАВОЧНЫХ ЭКСПОЗИЦИЙ ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В РИМ.....	123
Майоров Н. Н., Костин А. С., Богатов Н. В., Вознесенский Е. А. ИССЛЕДОВАНИЕ МАРШРУТИЗАЦИИ ПОЛЕТНЫХ ЗАДАНИЙ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПЕРАЦИОННЫХ СКЛАДСКИХ ЗАДАЧ	130
Пряничникова М. О., Уголков С. В. ОРГАНИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЗМЕЙ ИЗ ПЕРУ В ВОРОНЕЖ	138
Радочинская А. Ж., Янченко А. А., Маликова Т. Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ИМПОРТНОГО ГРУЗОПОТОКА НА КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ В СРЕДЕ МАТЛАВ.....	144
Таратун Е. А. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА	150
Титов И. С., Уголков С. В. ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ ОБРЕЗНЫХ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В МЕЖДУНАРОДНОМ СООБЩЕНИИ	153
Федотов Д. О., Уголков С. В. ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ ФАРФОРОВЫХ СЕРВИЗОВ ИЗ ДРЕЗДЕНА В САМАРУ	159
Щекина К. В. ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫВОЗА ОТХОДОВ.....	167
ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ.....	169
Бурлуцкий С. Г., Василянский В. И., Голосий А. С. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛЕТНОЙ ПАЛУБЫ КОРАБЛЯ АВИАНОСНОГО ТИПА	169
Бурлуцкий С. Г., Василянский В. И., Голосий А. С. ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АВИАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВИАНЕСУЩИХ КОРАБЛЕЙ	175
Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г. РЕАЛИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ НА БОРТУ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	182
Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г., Дуркин Р. П. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА БАЗЕ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РАДИОКОМУТАТОРОМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИМ БЕСПРОВОДНУЮ ПЕРЕДАЧУ ДАННЫХ	188
Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г., Фадеева Е. Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НАНЕСЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК.....	196
Езерский В. В., Кунтуров А. Л., Кунтуров С. А. СТРАТЕГИЯ ОЦЕНИВАНИЯ ГОТОВНОСТИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ПРЕДНАЗНАЧЕНИЮ.....	203
Езерский В. В., Пляскина А. А. К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УПРАВЛЕНИЯ БОКОВЫМ ТРАЕКТОРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО КРИТЕРИЮ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ	206
Королев Е. А., Кошкаров А. С. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ МЕЖСРЕДНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В КИТАЕ.....	211
Лебедева М. С., Скорина С. Ф. ДВУХОСНЫЙ ГИРОСТАБИЛИЗАТОР ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ПОСТРАДАВШЕГО ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ.....	216

Лезова И. Е. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ ВЕЩЕСТВА В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	219
Небылов А. В., Панферов А. И., Бродский С. А. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ БОЛЬШОГО УПРУГОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА	223
Овчинникова Н. А., Зайкин Д. В., Колесниченко А. Д. ПРОТИВОЮЗОВАЯ СИСТЕМА.....	228
Павлов А. М., Лесонен О. С. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАРСА.....	233
Пецевич М. Д., Тарасова Е. К., Кузьмичев Ю. А. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С КРУПНОГАБАРИТНОЙ АНТЕННОЙ.....	237
Семенова В. П., Авдеев В. А. ПРИМЕНЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПО СИГНАЛАМ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В БОРТОВОЙ СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ	240
Тимофеев В. И., Овчинникова Н. А. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФЛУКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС/GPS.....	244
Тимофеев В. И., Овчинникова Н. А. СПОСОБЫ УЧЕТА СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ТОЧНОСТЬ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОЙ ПРИВЯЗКИ НАЗЕМНЫХ И ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС/GPS	248
Тимофеев В. И., Слюсаренко А. С., Пузий Е. А. МЕТОД РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ АВИАЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И ОПТИКО-ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ	255
АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ	261
Алексеева К. И., Оленев В. Л. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ЗАДЕРЖЕК ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ ДАННЫХ В БОРТОВЫХ СЕТЯХ SPACEWIRE.....	261
Богданова А. В., Сыщиков А. Ю. ЗАДАЧИ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	265
Виноградов А. Ю., Суворова Е. А. ПРОБЛЕМЫ ОБМЕНА ДАННЫМИ В МУЛЬТИ-ПРОТОКОЛЬНЫХ СЕТЯХ ETHERNET-SPACEWIRE И ETHERNET-SPACEFIBRE И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ.....	268
Иванов В. Н., Иванов Д. В. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ АРХИТЕКТУРЫ РЕКОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО.....	272
Ковалёв С. И., Винарь П. О. ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ ИЗ ГРАФОВ КЛЕТОК	279
Оленев В. Л. ПРИМЕНЕНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПРОТОКОЛА СТП ИСС ДЛЯ БОРТОВЫХ СЕТЕЙ SPACEFIBRE.....	284
Оленев В. Л., Карандашев А. А. МЕТОДЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ БЕСТУПИКОВЫХ МАРШРУТОВ В БОРТОВЫХ СЕТЯХ SPACEWIRE.....	293
Оськина Е. Д., Луцив В. Р. АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОБИЛЬНОГО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ	303
Петров А. Ю., Оленев В. Л. ФОРМАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ	309
Рождественская К. Н. КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕРВИСОВ В ПРОТОКОЛЕ PLUG-AND-PLAY ДЛЯ СЕТЕЙ SPACEWIRE	317
Соколова А. А., Сыщиков А. Ю. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К ЗАДАЧАМ НА ГРАФАХ.....	321
Суворова Е. А. МЕХАНИЗМЫ синхронизации времени для сетей SPACEFIBRE	325
Суворова Е. А. ПРОБЛЕМА БЛОКИРОВКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ОТКАЗОВ И СБОЕВ В СНК.....	339
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	344

Научное издание

АЭРОКОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Вторая Международная научная конференция
14–22 апреля 2021 г.

Сборник докладов

ISBN: 978-5-8088-1554-4



9 785808 815544

Ответственный за выпуск

В. Е. Таратун

Редакторская подготовка *В. А. Черниковой*

Верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати. 10.03.21. Формат 60х84 1/8.
Усл. печ. л. 41,2. Уч.-изд. л. 44,4. Тираж 150 экз. Заказ № 27.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67