

**Труды Военно-космической
академии имени А. Ф. Можайского**

**Выпуск 694
2024 г.**

Научное рецензируемое издание

Выходит с 1942 года

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение
высшего образования «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского»
Министерства обороны Российской Федерации

Редакционный совет

Председатель:

Начальник Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского
доктор военных наук А. Н. Нестечук

Члены редакционного совета:

- С. В. Буг** – доктор пед. наук, проф. (Михайловская военная артиллерийская академия);
В. П. Гаенко – доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации
(12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации);
А. М. Гончаров – доктор воен. наук, проф. (Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»);
М. А. Еремеев – доктор техн. наук, проф. (Московский технологический университет);
А. В. Кузичкин – доктор техн. наук, проф. (Научно-исследовательский институт телевидения);
А. В. Сержантов – доктор воен. наук, проф. (Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил
Российской Федерации);
Б. В. Соколов – доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации
(Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук);
К. Г. Ставров – доктор техн. наук, проф. (Государственный научно-исследовательский
навигационно-гидрографический институт)

Главный редактор:

доктор техн. наук, проф. Ю. В. Кулешов

Редколлегия:

- председатель **Ю. В. Кулешов**, доктор техн. наук, проф.;
зам. председателя **И. В. Сахно**, доктор техн. наук, проф.;
ответственный секретарь **А. Л. Федер**, доктор воен. наук, доц.;
Н. Ф. Аверкиев, доктор техн. наук, проф.; **В. Ф. Алексеев**, доктор техн. наук, проф.;
Т. В. Алексеев, доктор истор. наук, доц.; **А. П. Алёшкин**, доктор техн. наук, проф.;
В. Н. Арсеньев, доктор техн. наук, проф.; **Д. Н. Бирюков**, доктор техн. наук, проф.;
И. А. Готюр, доктор техн. наук, проф.; **А. П. Доронин**, доктор техн. наук, проф.;
И. Ю. Еремеев, доктор техн. наук, проф.; **В. Н. Калинин**, доктор техн. наук, проф.;
Б. Д. Казахов, доктор воен. наук, проф.; **В. В. Клейменов**, доктор техн. наук, проф.;
В. В. Козлов, доктор техн. наук, проф.; **Н. С. Кужекин**, кандидат филос. наук, проф.;
В. Н. Кузьмин, доктор воен. наук, проф.; **Н. Б. Кунтурова**, доктор пед. наук, доц.;
Е. Л. Лебедев, доктор техн. наук, проф.; **А. Г. Ломако**, доктор техн. наук, проф.;
А. И. Лоскутов, доктор техн. наук, проф.; **Г. Н. Мальцев**, доктор техн. наук, проф.;
Т. О. Мысливцев, доктор техн. наук, проф.; **Е. А. Новиков**, доктор техн. наук, доц.;
А. Н. Павлов, доктор техн. наук, проф.; **А. В. Паршуткин**, доктор техн. наук, проф.;
Н. А. Репях, кандидат филос. наук, доц.; **А. М. Сычева**, доктор техн. наук, проф.;
И. В. Фоминов, доктор техн. наук, проф.; **А. В. Чарушников**, доктор воен. наук, проф.

Издание зарегистрировано
Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзора).
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-45867 от 20 июля 2011 г.
Издание включено в перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы
основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,
на соискание ученой степени доктора наук (с 01 декабря 2015 г.).
Издание включено в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Ответственный за выпуск:
редактор **А. В. Головина**
Технический редактор
и компьютерная верстка: **Е. Е. Лавриенко**
Техническая поддержка:
К. И. Чувирова

Адрес:
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;
тел.: 8 (812) 347-97-05;
<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 24.12.2024.
Формат печатного листа 320×450/2.
Уч.-печ. л. 71,00. Уч.-изд. л. 35,00
Тираж 26 экз. Заказ 4193/106.
Отпечатано в типографии
Военно-космической академии
имени А. Ф. Можайского

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Богачев Е. Е., Петухов А. М.* Методический подход к распределению личного состава организационно-технической системы военного назначения по временным формированиям..... 6
- Кадочников А. П., Петрич Д. О., Пророк В. Я.* Исследование потерь производительности вычислительных систем для обеспечения требуемой результативности обработки информации о космических объектах 13
- Нагибин Д. В., Платонов А. А., Руссу В. Ю., Сабиров Т. Р.* Модель анализа двоичного кода программ на основе методов машинного обучения 27

СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

- Бахолдин В. С., Добриков В. А.* Повышение точности решения навигационной задачи в аппаратуре потребителя системы ГЛОНАСС на основе оценивания параметров ионосферы 43
- Дмитриев А. К.* Определение отказов функциональных элементов сетевой инфраструктуры центра обработки данных специального назначения, не требующее дополнительного диагностического обеспечения за счет анализа пакетов стандартных протоколов передачи данных 50
- Конищев В. С., Мальцев Г. Н.* Методика анализа помехоустойчивости командно-измерительных систем с фазоманипулированными сигналами с расширением спектра в условиях узкополосных помех 57
- Копалов Ю. Н., Маслаков П. А., Паришуткин А. В.* Модель функционирования канала связи с ортогональным частотным разделением (OFDM) в условиях эпизодической синхронизации с потоком непреднамеренных импульсных помех 67
- Латанова О. И., Онуфрей А. Ю., Разумов А. В., Шемякин В. Н.* Оценка электромагнитной совместимости технических систем в условиях накопления энергии последовательности электромагнитных импульсов 76
- Логунов С. В.* Расширение фотометрического портрета геостационарного искусственного космического объекта на основе спектрофотометрической информации 83
- Сафиулов Д. М.* Методика формирования архитектуры системы мониторинга технического состояния техники связи узла связи пункта управления оперативного объединения 93

СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Готюр И. А., Корыстин А. А., Шевченко А. В., Яременко И. А.* Моделирование переноса аэрозоля в пограничном слое атмосферы с различными типами подстилающей поверхности на основе Лагранжевой дискретной фазовой модели 103
- Готюр И. А., Овчинников Ю. Д.* Аппроксимация временных рядов наблюдений с применением модели нормализующих потоков с ячейками LSTM для прогнозирования опасных метеорологических явлений 116

Кучеренко О. В., Медяников Д. О., Печников С. Н., Сергеев Д. В. Результаты оценивания точности определения пространственного положения пунктов в режиме реального времени с использованием спутниковой геодезической аппаратуры 124

РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ. ВОЕННАЯ МЕТРОЛОГИЯ

Андреев В.В., Лбов Е.А., Мальцев Г.Н. Техническое диагностирование космических аппаратов в процессе летной эксплуатации в центре управления полетом 134

Антропова А. В., Козлов В. В., Лагун А. В., Харченко В. А. Математические модели базовых технологических процессов для основных видов технологического оборудования ракетно-космических комплексов 142

Басотин Е.В., Вивчарь Р.М., Птушкин А.И. Проактивное управление техническим состоянием оборудования критически важных объектов..... 150

Бянкин А. А., Ломтев В. Н., Лоскутов А. И., Перле В. Г., Семенюк Д. Б. Модель процесса интеллектуальной обработки диагностической информации в экспертных системах поддержки принятия решений при структурной идентификации автономных динамических объектов 157

Груздев Н. В., Исупов А. А., Степанов С. С., Шакмаев И. В. Методика определения энергетических возможностей ракеты космического назначения по изменению параметров орбиты выведения полезной нагрузки с использованием бокового маневра 170

Зубков А. В., Фоминов И. В. Исследование влияния нестационарных вибрационных возмущений на погрешности бесплатформенной инерциальной навигационной системы ракеты-носителя 179

Калюта А. Н., Мальцев Г. Н., Якимов В. Л. Информационно-телеметрическое обеспечение управления космическими аппаратами с высоким уровнем автономности с использованием обобщенных параметров технического состояния 189

Камчалов С. С., Карагодин В. В., Рыбаков Д. В. Модели системы электроснабжения для оценивания ее параметров в различных режимах функционирования потребителей 196

Каргу Д. Л., Стеганов Г. Б., Янгузов А. В. Моделирование режимов работы устройства накопления электрической энергии для системы электроснабжения космического аппарата..... 204

Клыков В. А., Ломтев В. Н., Лоскутов А. И., Перле В. Г., Семенюк Д. Б. Интеллектуализация функций поддержки принятия решений при испытаниях и эксплуатации изделий ракетно-космической техники с использованием нечетких правил логического вывода 216

Маслова Л. А., Мужичек С. М., Савенко А. К., Скрынников А. А., Хрулин С. В. Организация вычислительного эксперимента при оценке опасности поражения ударного беспилотного летательного аппарата осколками собственных бомб 226

Наумчик И. В., Помошник М. В., Прилуцкий И. К. Повышение производительности компрессорной станции системы газоснабжения стартового комплекса на основе математической модели рабочих процессов в поршневой ступени с учетом акустического наддува 237

ПРОБЛЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ, ВОИНСКОГО ОБУЧЕНИЯ И ВОСПИТАНИЯ, УПРАВЛЕНИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ВОЙСК

- Менисов А. Б., Чернышов В. В.* Оценивание качества выполнения упражнений физической подготовки на основе искусственных нейронных сетей 248
- Печников А. Н., Шиков А. Н.* Перспективы применения искусственного интеллекта в процессе адаптивного обучения и подготовки специалистов Военно-морского флота 253

ВОПРОСЫ ГУМАНИТАРНЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ НАУК

- Блинкова С. А., Веляева К. С., Новиков Д. В., Черняев Е. В.* Экономико-математическая модель согласования функционального и отраслевого взаимодействия исполнителей научно-инновационной продукции в кооперационной цепи 260
- Рефераты статей 267
- Сведения об авторах 275
- Сведения о рецензентах 281

Е. Е. Богачев;
А. М. Петухов,
кандидат технических наук

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЛИЧНОГО СОСТАВА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО ВРЕМЕННЫМ ФОРМИРОВАНИЯМ

Рассматривается методический подход к распределению личного состава организационно-технической системы военного назначения по временным формированиям на период выполнения мероприятий повышения ее готовности к выполнению задач применения.

Ключевые слова: организационно-технические системы военного назначения, распределение личного состава.

ВВЕДЕНИЕ

При эскалации угроз военных конфликтов в организационно-технических системах военного назначения (далее – ОТС ВН) проводятся мероприятия повышения их готовности к выполнению задач применения для парирования вероятных воздействий (далее – мероприятия). Перечень этих мероприятий достаточно объемён [1], они проводятся дополнительно к повседневным.

В исходном состоянии, соответствующем отсутствию каких-либо угроз, ОТС ВН по количеству личного состава сбалансирована для решения повседневных задач. В период повышения готовности организационно-технических систем военного назначения количество личного состава, привлекаемого к выполнению возросшего количества задач, значительно увеличивается. Традиционно распределение личного состава по временным формированиям ОТС ВН (далее – распределение по формированиям) на этот период осуществляется заблаговременно (в подготовительный период) [2], а расчет сил и средств составляется, основываясь на штатной численности ОТС ВН.

В силу особенностей, связанных с функционированием организационно-технических систем военного назначения, фактическая численность личного состава в различные периоды может быть меньше штатной. В таких условиях выполнение отдельных операций в сроки, установленные разработанными на штатную численность планами мероприятий, может быть проблематичным по причине недостаточного количества свободных исполнителей в требуемые промежутки времени. Исключить подобные ситуации позволит такое планирование мероприятий, которое содержит несколько вариантов их выполнения в зависимости от степени нехватки личного состава. При этом градация по степеням нехватки личного состава осуществляется экспертным методом.

В настоящее время, несмотря на периодически возникающую потребность решения управленческих задач распределения личного состава по временным формированиям для выполнения задач по предназначению в подобных условиях, описание соответствующего научно обоснованного инструментария в литературе отсутствует, а его создание является актуальной задачей. Для решения этой задачи авторами статьи разработан методический подход, позволяющий распределить личный состав ОТС ВН по временным формированиям с учетом степени нехватки личного состава.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ПО ФОРМИРОВАНИЯМ

В предлагаемом методическом подходе к распределению по формированиям (далее – методический подход) расчет сил основывается на прогнозируемом количестве личного состава ОТС ВН в период повышения ее готовности.

В соответствии с методическим подходом процесс распределения по формированиям (далее – процесс распределения) состоит из этапов (рис. 1):

- составления проекта распределения по формированиям (далее – проект распределения);
- построения (уточнения) графиков привлечения исполнителей к выполнению мероприятий (далее – сводные графики);
- разработки рационального варианта распределения по формированиям.

Проект распределения составляется в соответствии с предварительным расчетом сил и средств, подготовленным органом управления ОТС ВН, на основе предложений от начальников подразделений и служб (рис. 2) по назначению личного состава на должности в формированиях (далее – предложения по должностям).



Рис. 1. Основные этапы процесса распределения по формированиям

Предложение по назначению *1-го* подразделения на должности в формированиях

№ п/п	Фамилия И.О.	Формирование				
		Ф ¹	Ф ²	Ф ³	...	Ф ^F
1	Андреев В.М.	Ф ¹ ₁₂ 04 ⁰⁰ -07 ⁰⁰		Ф ¹ ₀₉ 02 ⁰⁰ -03 ⁰⁰	...	
2	Васильев Д.Е.		Ф ² ₀₁ 03 ⁰⁰ -04 ⁰⁰		...	Ф ² ₀₂ 00 ⁰⁰ -03 ⁰⁰
3	Иванов А.Б.		Ф ² ₀₂ 03 ⁰⁰ -04 ⁰⁰		...	
...
15	Маслов П.К.				...	Ф ² ₀₂ 00 ⁰⁰ -03 ⁰⁰
16	Смирнов К.Р.			Ф ¹ ₁₀ 02 ⁰⁰ -03 ⁰⁰	...	
17	Топоров З.П.		Ф ² ₀₅ 03 ⁰⁰ -04 ⁰⁰		...	Ф ² ₀₂ 00 ⁰⁰ -03 ⁰⁰

Начальник 1-го подразделения
А. Котлов

а)

Предложение по назначению исполнителей на должности в формированиях

Подразделение	Формирование			
	Ф ¹	Ф ²	...	Ф ^F
<i>1-е</i> подразделение	Ф ¹ ₀₂ 04 ⁰⁰ -07 ⁰⁰ – 1 чел. Ф ¹ ₀₄ 04 ⁰⁰ -07 ⁰⁰ – 7 чел.	Ф ² ₀₁ 01 ⁰⁰ -04 ⁰⁰ – 1 чел. Ф ² ₀₃ 01 ⁰⁰ -04 ⁰⁰ – 3 чел.	...	
<i>2-е</i> подразделение		Ф ² ₀₃ 01 ⁰⁰ -04 ⁰⁰ – 12 чел.	...	Ф ² ₀₂ 00 ⁰⁰ -03 ⁰⁰ – 1 чел. Ф ² ₁₁ 00 ⁰⁰ -03 ⁰⁰ – 15 чел.
...
<i>3-е</i> подразделение	Ф ¹ ₀₁ 04 ⁰⁰ -07 ⁰⁰ – 2 чел.		...	Ф ² ₀₂ 00 ⁰⁰ -03 ⁰⁰ – 1 чел. Ф ² ₁₁ 00 ⁰⁰ -03 ⁰⁰ – 10 чел.

Начальник службы
Э. Зверев

б)

Рис. 2. Вариант формы предложений от начальников подразделений (а) и служб (б) по назначению личного состава на должности в формированиях:

Ф^{f_{dd}} – индекс *f*-го формирования; Ф^{f_{dd}} – индекс должности в *f*-м формировании;
dd – порядковый номер; *F* – количество формирований

Как правило, при значительной нехватке личного состава по объективным причинам возникают проблемные ситуации, связанные с превышением потребности в исполнителях отдельных специальностей над их фактическим количеством на ограниченных интервалах времени (далее – проблемные ситуации). Эти проблемные ситуации наиболее часто разрешаются перераспределением исполнителей и изменением интервалов времени привлечения к выполнению мероприятий на втором этапе процесса распределения.

ПОРЯДОК ПОСТРОЕНИЯ СВОДНЫХ ГРАФИКОВ ПРИВЛЕЧЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ К ВЫПОЛНЕНИЮ МЕРОПРИЯТИЙ

Для выявления проблемных ситуаций осуществляется построение сводных графиков (рис. 3) для каждой специальности исполнителей.

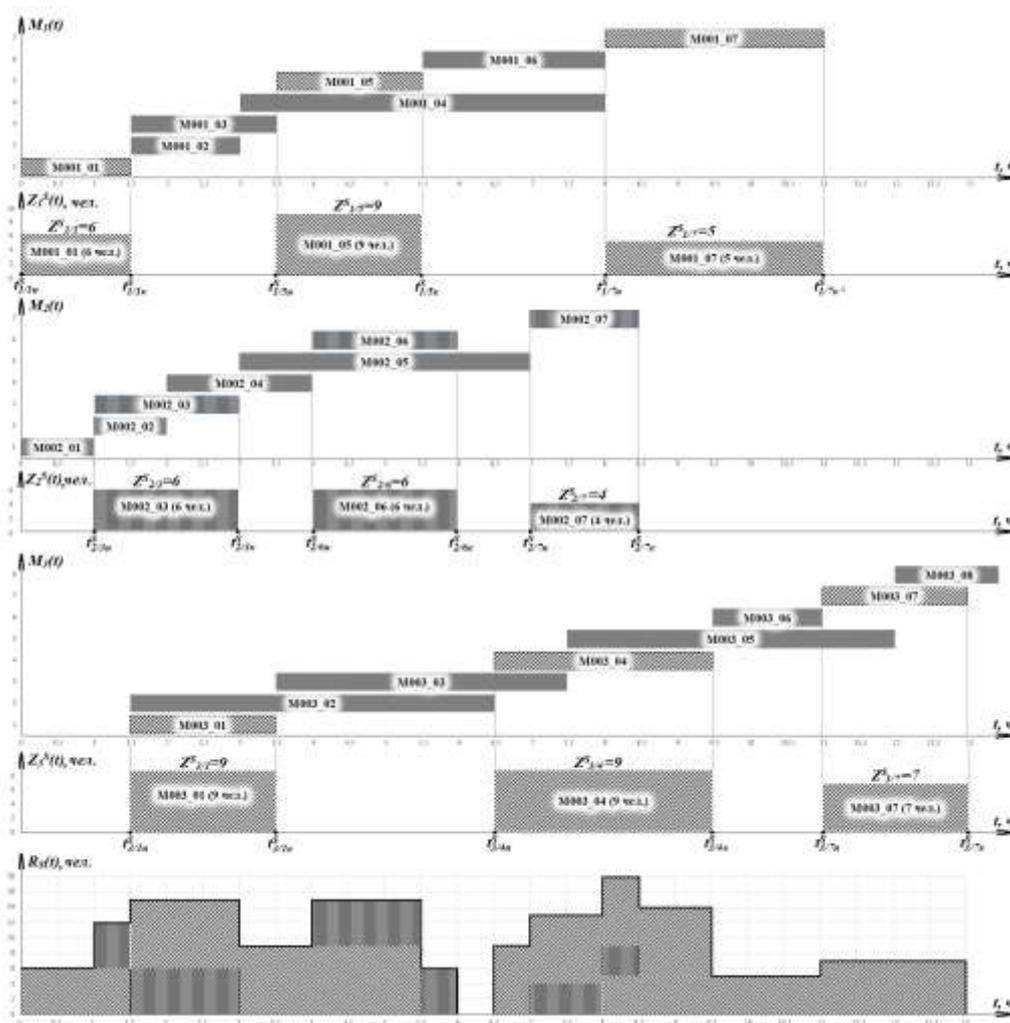


Рис. 3. Построение сводного графика привлечения исполнителей к выполнению мероприятий:

$M_m(t)$ – операционный график m -го мероприятия; $Z_m^s(t)$ – график задействования исполнителей s -й специальности на m -м мероприятии; $t_{m/q}^s$, $t_{m/q}^s$ – времена начала и завершения q -й операции m -го мероприятия исполнителями s -й специальности; $Z_{m/q}^s$ – количество исполнителей s -й специальности, участвующих в выполнении q -й операции m -го мероприятия; $R_s(t)$ – график привлечения исполнителей s -й специальности к выполнению мероприятий (сводный график)

Сводный график $R_s(t)$ образуется суммированием графиков задействия исполнителей по мероприятиям $Z_m^s(t)$, которые являются выборкой по исполнителям s -й специальности из операционных графиков мероприятий $M_m(t)$.

Порядок построения сводного графика проиллюстрирован на рис. 3. В качестве исходных данных приняты операционные графики трех мероприятий $M_1(t)$, $M_2(t)$, $M_3(t)$ и соответствующие им графики задействия $Z_1^s(t)$, $Z_2^s(t)$, $Z_3^s(t)$. Сводный график привлечения исполнителей s -й специальности к выполнению мероприятий $R_s(t)$ представлен в нижней части рис. 3. Составные части графиков задействия $Z_1^s(t)$, $Z_2^s(t)$, $Z_3^s(t)$ в сводном графике представлены соответствующей штриховкой.

Как видно из рис. 3 сводный график $R_s(t)$ в приведенном примере неравномерный, имеет явно выраженные максимумы и минимумы, что позволяет его корректировать. Сводный график в таком виде используется для поиска проблемных ситуаций на следующем этапе.

СОДЕРЖАНИЕ ЭТАПА РАЗРАБОТКИ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ФОРМИРОВАНИЯМ

На третьем этапе процесса распределения анализируется сводный график, перераспределяются исполнители и корректируются интервалы времени их привлечения к выполнению мероприятий, уточняются операционные графики мероприятий. Содержание третьего этапа проиллюстрировано на рис. 4. Сводный график $R_s(t)$, изображенный на рис. 4, соответствует данным приведенного на рис. 3 примера. Очевидно, что минимальное количество исполнителей, при котором рассматриваемый вариант выполнения мероприятий реализуем, определяется максимумом сводного графика $\max\{R_s(t)\} = 18$ человек. Это значение является ориентиром при распределении исполнителей. Снижение количества исполнителей s -й специальности для рассматриваемого варианта выполнения мероприятий ниже этого уровня приведет к возникновению проблемных ситуаций.

Для пояснения содержания третьего этапа в дополнение к исходным данным принимается, что прогнозируемое количество исполнителей s -й специальности $R_{s\text{макс}}$ составляет 14 человек. Определяется также, что все операции мероприятий масштабируемы по количеству исполнителей и времени, за исключением 7-й операции 2-го мероприятия, 4-й и 7-й операций 3-го мероприятия. При этом времена начала и окончания операций должны оставаться в пределах, установленных исходными операционными графиками. Кроме того, при расчетах допускается, что возможно масштабирование по количеству исполнителей взаимодействующих специальностей в аналогичных размерах. Под масштабированием понимается изменение количества исполнителей с одновременным обратно пропорциональным изменением длительности операции.

Анализ сводного графика $R_s(t)$ на рис. 4 позволяет определить, что в условиях прогнозируемого количества исполнителей $R_{s\text{макс}} = 14$ человек возникают три проблемные ситуации на интервалах времени $t \in [1,5;3]$ ч, $t \in [4;5,5]$ ч, $t \in [8;8,5]$ ч, которые для удобства описания условно называются «первая», «вторая» и «третья» соответственно.

Для разрешения проблемных ситуаций в общей координатной плоскости (рис. 4) осуществляется построение семейства графиков задействия $Z^s(t)$ и графиков задействия исполнителей s -й специальности в q -х операциях m -х мероприятий $J_{m/q}^s(t)$ (далее – графиков операций). Решениями по выходу из проблемных ситуаций будут являться точки пересечения графиков операций (точки 2 и 3 на рис. 4) либо значения графиков операций в момент времени начала или окончания смежной операции (точки 1 и 4 на рис. 4).

Построение графиков операций осуществляется для времени начала (окончания) операции при фиксированном времени ее окончания (начала) соответственно. График операции представляет собой геометрические места точек со значениями, равными количеству личного состава, привлекаемого к выполнению операции.

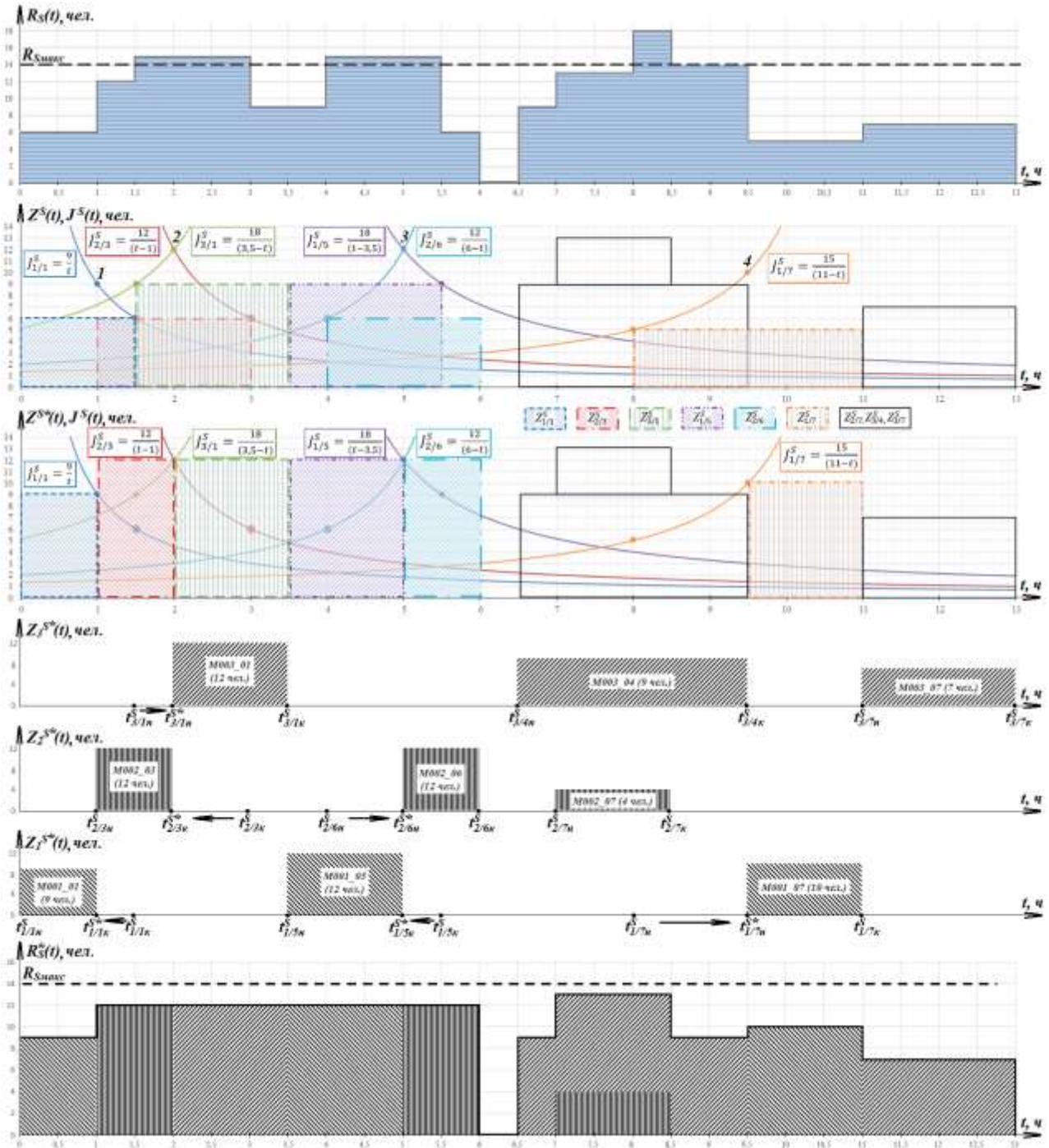


Рис. 4. Разработка варианта распределения по формированиям:

$Z^s(t)$, $Z^{s*}(t)$ – семейство графиков задействования исполнителей s -й специальности на мероприятиях (исходные и после коррекции соответственно); $Z_m^{s*}(t)$ – уточненный (после коррекции) график задействования исполнителей s -й специальности на m -м мероприятии; $J_{m/q}^s(t)$ – график задействования исполнителей s -й специальности в q -й операции m -го мероприятия; $t_{m/qn}^{s*}$, $t_{m/qk}^{s*}$ – уточненные (после коррекции) времена начала и завершения q -й операции m -го мероприятия исполнителями s -й специальности; $R_s^*(t)$ – уточненный (после коррекции) график привлечения исполнителей s -й специальности к выполнению мероприятий; $R_{сmax}$ – прогнозируемое количество исполнителей s -й специальности в ОТС ВН

Решение по выходу из первой проблемной ситуации достигается одновременным внесением изменений, к которым относятся:

- уменьшение интервала выполнения 1-й операции 1-го мероприятия с 1,5 ч до 1 ч с увеличением количества исполнителей до 9 человек при сохранении времени начала операции;
- уменьшение интервала выполнения 6-й операции 2-го мероприятия с 2 ч до 1 ч с увеличением количества исполнителей до 12 человек при сохранении времени начала операции;
- уменьшение интервала выполнения 1-й операции 3-го мероприятия с 2 ч до 1,5 ч с увеличением количества исполнителей до 9 человек при сохранении времени завершения операции.

Решение по выходу из второй проблемной ситуации – одновременным внесением изменений, к которым относятся:

- уменьшение интервала выполнения 5-й операции 1-го мероприятия с 2 ч до 1,5 ч с увеличением количества исполнителей до 12 человек при сохранении времени начала операции;
- уменьшение интервала выполнения 3-й операции 2-го мероприятия с 2 ч до 1 ч с увеличением количества исполнителей до 12 человек при сохранении времени завершения операции.

Решение по выходу из третьей проблемной ситуации достигается уменьшением интервала выполнения 7-й операции 1-го мероприятия с 3 часов до 1,5 часов с увеличением количества исполнителей до 10 человек при сохранении времени завершения операции.

Уточненные в результате преобразований графики задействования $Z_1^{s^*}(t)$, $Z_2^{s^*}(t)$, $Z_3^{s^*}(t)$ и созданный на их основании сводный график представлены в нижней части рис. 3. Как видно, максимальное количество исполнителей s -й специальности, привлекаемых к выполнению мероприятий, после коррекции графиков задействования $\max\{R_s^*(t)\} = 13$ человек, что означает возможность реализации всех операций мероприятий в установленные сроки прогнозируемым количеством исполнителей s -й специальности.

После разрешения проблемных ситуаций в операционные графики мероприятий вносятся коррективы, учитывающие описанные изменения (рис. 5).

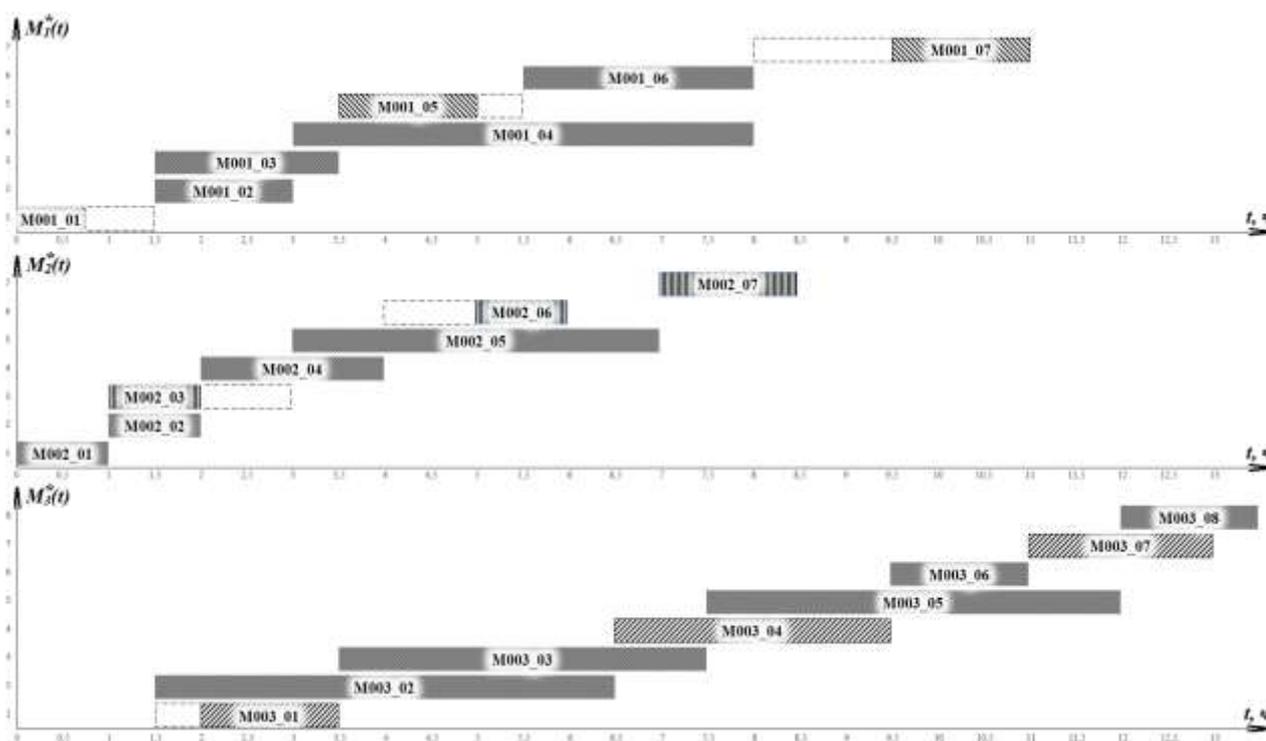


Рис. 5. Уточненные операционные графики мероприятий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием рассмотренного в статье научно-методического аппарата процесс распределения личного состава ОТС ВН по временным формированиям осуществляется с учетом степени нехватки личного состава в три этапа: составления проекта распределения по формированиям; построения (уточнения) графиков привлечения исполнителей к выполнению мероприятий; разработки рационального варианта распределения по формированиям. Основу методического подхода составляет расчетно-графический инструментарий, использующий общеизвестные графические способы решения линейных уравнений. Применение методического подхода предполагает позволяет при планировании мероприятий разработать несколько вариантов их выполнения в зависимости от степени нехватки личного состава.

Основные расчеты и построение графиков осуществляется с использованием пакета офисных программ. После соответствующей доработки разработанный инструментарий возможно применять в составе автоматизированных рабочих мест должностных лиц органов управления ОТС, благодаря чему могут быть улучшены показатели оперативности работы должностных лиц [2] и уменьшен интервал времени на уточнение решения.

Список используемых источников

1. *Петухов А. М., Холодок А. Ю.* Усовершенствованный алгоритм повышения готовности организационно-технической системы военного назначения к решению задач по предназначению в изменяющихся условиях обстановки // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 686. – С. 28–35.
2. *Петухов А. М., Холодок А. Ю.* Методический подход к оцениванию управления переводом организационно-технической системы военного назначения в различные состояния при деструктивных воздействиях на ее элементы // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687. – С. 320–326.

А. П. Кадочников,
кандидат технических наук, доцент;
Д. О. Петрич,
кандидат технических наук;
В. Я. Пророк,
доктор технических наук, профессор

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Работа посвящена исследованию вопросов потерь производительности вычислительных систем, функционирующих в составе автоматизированных систем обработки информации о космических объектах, с учетом факторов, характерных для типовых задач, решаемых вычислительными средствами. Цель работы заключается в обеспечении требуемой результативности обработки информации о космических объектах на основе прогнозирования потерь производительности вычислительных систем. Результаты исследования позволят обоснованно сформулировать требования к архитектуре и характеристикам автоматизированных систем обработки информации о космических объектах.

Ключевые слова: вычислительная система, автоматизированная система, траектория, космический объект, архитектура вычислительной системы, производительность, программирование, тестирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития научно-технического прогресса характеризуется активизацией процесса освоения человеком околоземного космического пространства, что приводит к формированию устойчивых тенденций увеличения объемов данных, получаемых в технических системах, и, как следствие, к значительному увеличению сложности и трудоемкости процесса обработки информации вычислительными системами (ВС), входящими в состав комплекса средств автоматизации (КСА) автоматизированных систем (АС), решающих задачи обработки траекторной информации о космических объектах. Вопросы обеспечения высокой эффективности процесса сбора и обработки информации указанными средствами в условиях значительного увеличения вычислительной нагрузки на систему приобретают особое значение. Часто на этапе проектирования, разработки и последующей эксплуатации современных ВС расчет требуемых значений качества их функционирования производится не вполне корректно, что, с одной стороны, может привести к невыполнению целевой функции системой (при неоправданном занижении требований), а с другой – к значительному завышению стоимости ВС (при неоправданном завышении требований). В случае систем, решающих задачи обработки траекторной информации о космических объектах, неправильное определение минимально необходимых характеристик вычислительных средств может привести к невыполнению требований режима жесткого реального времени или снижению объемов одновременно обрабатываемых данных, что в свою очередь приведет к пропускам целей, завязкам ложных траекторий, неверному определению типов объектов, т. е. к срыву выполнения поставленных задач.

Попытки решения данной проблемы определяют одну из перспективных тенденций развития АС – обоснование структуры и требований к показателям эффективности функционирования ВС, входящих в их состав, с целью обеспечения требуемых результатов качества функционирования ВС в целом и обеспечения результативности обработки траекторной информации о космических объектах в частности.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

В основу процесса функционирования систем, решающих задачи обработки траекторной информации о космических объектах, положены различные физические принципы:

1) активное зондирование околоземного космического пространства радиолокационными средствами (для радиолокационных систем);

2) обнаружение электромагнитных волн солнечного и инфракрасного излучения, отраженных от поверхности космического объекта (для оптико-электронных систем);

3) обнаружение сигналов, излучаемых космическими объектами, в пассивном режиме (для радиотехнических систем).

Изложенные выше подходы к сбору информации определяют комплекс типовых задач, решаемых системами обработки траекторной информации о космических объектах (рис. 1, 2) [17].



Рис. 1. Задачи обнаружения, захвата и сопровождения космических объектов



Рис. 2. Задачи определения параметров орбит космических объектов

Для решения типовых задач обработки траекторной информации о космических объектах применяются следующие алгоритмы:

- алгоритмы цифровой обработки сигналов;
- алгоритмы обнаружения, захвата и сопровождения космических и баллистических объектов;
- алгоритмы селекции, расчета элементов орбит, классификации и распознавания КО, расчета вероятности столкновений при опасных сближениях КО.

Состав указанных алгоритмов представлен на рис. 3–5 [12, 17].



Рис. 3. Типовые алгоритмы цифровой обработки сигналов



Рис. 4. Типовые алгоритмы обнаружения, захвата и сопровождения космических и баллистических объектов



Рис. 5. Типовые алгоритмы селекции, расчета элементов орбит, классификации и распознавания КО, расчета взаимного сближения и вероятности столкновений при опасных сближениях КО

Типовые задачи обработки траекторной информации о космических объектах, применяемые алгоритмы и наиболее типичные операции, лежащие в основе их функционирования, представлены в табл. 1 [15].

Таблица 1

Типичные операции, лежащие в основе функционирования вычислительных систем при решении задач обработки информации о космических объектах

Типовые задачи обработки траекторной информации о КО	Типовые алгоритмы	Типичные операции
Задачи обнаружения, захвата и сопровождения космических объектов	Алгоритмы обнаружения, захвата и сопровождения космических и баллистических объектов	1) операции умножения с накоплением; 2) операции сравнения; 3) сложение матриц; 4) нахождение обратных матриц;
Задачи определения параметров орбит космических объектов	Алгоритмы селекции, расчета элементов орбит, классификации и распознавания КО, расчета взаимного движения и вероятности столкновений при опасных сближениях КО	5) скалярное и векторное умножение матриц; 6) операции поэлементной обработки матриц; 7) топологические преобразования матриц; 8) тригонометрические преобразования элементов матриц; 9) операции обработки в локальной окрестности (чтение и запись данных, находящихся в регистрах процессора / регистровом файле / кэш-памяти верхнего уровня); 10) операции обработки глобального уровня (чтение и запись данных, находящихся в оперативной памяти / жестком диске / удаленном сетевом ресурсе)

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценивание эффективности функционирования ВС при решении указанных выше задач (реализации алгоритмов) должно производиться в рамках теории эффективности целенаправленных процессов и обусловлено необходимостью [2, 14]:

- оптимизации функциональной структуры системы;
- выбора варианта вложения типовых задач на архитектуру вычислительной системы;
- выбора управленческих решений.

Как правило, оценивание эффективности функционирования современных ВС производится на основе анализа их *производительности*.

Исследование производительности современных ВС со сложной архитектурой и топологией представляет в настоящее время актуальную задачу. Существует несколько подходов к оценке производительности систем, наиболее универсальным является использование набора тестов производительности. К таким тестам относятся: 007 (ODBMS), AIM, Dhrystone, Khornerstone, LFK (Livermore Loops), LINPACK, MUSBUS, NAS Kernels, Nhfstone, PERFECT, RhosettaStone, SLALOM, SPEC, SSBA, TPC, WPI Benchmark Suite, Whetstone, Xstone, SYSmark, Stanford, IOBENCH, IOZONE, Byte, Netperf, Nettest, Hartstone, EuroBen, Fhourstones, Heapsort, Hanoi, Flops, C LINPACK, TFFTD, Matrix Multiply (MM), Digital Review [4, 8, 11, 21].

В работе [18] проведен подробный анализ значений производительности ВС с использованием широкого набора синтетических тестов, результаты которого представлены далее.

В табл. 2 представлены список протестированных процессоров и их характеристики.

Таблица 2

Технические характеристики тестируемых процессоров

Платформа	Процессор	Ядер	Тактовая частота (MHz)	Архитектура
AMD Ryzen 7 3700X	AMD Ryzen 7 3700X 8-Core Processor	16	3600	amd64
Apple M1	Apple M1 (APL1102) @ 3.2 GHz	8	3200	aarch64
Baikal M1000	Baikal Electronics M1000 (Cortex A57)	8	1500	aarch64
Core i3-m330	Intel(R) Core(TM) i3 CPU M 330 @ 2.13GHz	4	2133	amd64
Core i7-2600	Intel(R) Core(TM) i7-2600 CPU @ 3.40GHz	8	3400	amd64
Core i7-4700MQ	Intel(R) Core(TM) i7-4700MQ CPU @ 2.40GHz	8	2400	amd64
E2C+DSP	Elbrus 2C	2	500	e2k
E2S-PC401	Elbrus 4C [E2S] (pc401)	4	800	e2k
E8C-E8C4	Elbrus 8C (4 CPU)	32	1300	e2k
E8C2	Elbrus 8C2 (E8C2)	8	1500	e2k
MBE1C-PC	Elbrus 1C+ (MBE1C-PC)	1	985	e2k
Xeon 6128	Intel(R) Xeon(R) Gold 6128 CPU @ 3.40GHz (2 CPU)	24	3400	amd64

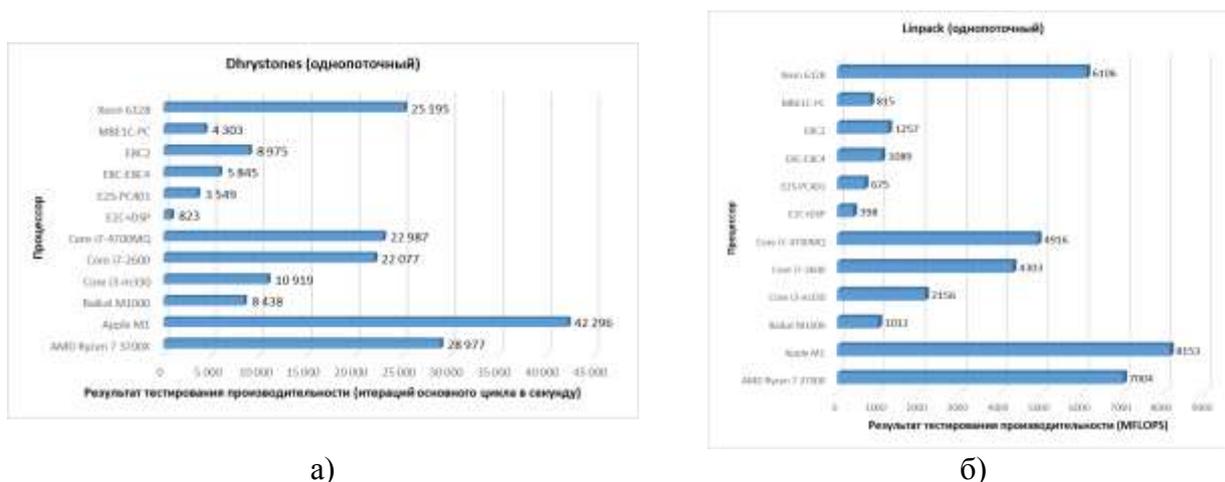
На рис. 6 и 7 представлены результаты выполнения тестов Dhrystones (однопоточный), Linpack (однопоточный), mpmflops для тестируемых процессоров.

Dhrystone – синтетический тест производительности компьютеров, предназначенный для тестирования целочисленной производительности процессоров общего назначения. Результатом выполнения теста является Dhrystones per second (количество итераций основного цикла в секунду).

Linpack – тест для измерения производительности при обработке чисел с плавающей запятой, определяет количество операций, которые компьютер выполняет за секунду, обозначаемое термином FLOPS.

Тест MPMFLOPS – это универсальный тест вычислений с плавающей точкой. Результатом выполнения теста является количество операций над числами с плавающей запятой, обозначаемое FLOPS.

Проведенный анализ позволяет сделать заключение об отсутствии универсального подхода при оценивании производительности ВС [4, 9].



а)

б)

Рис. 6. Результаты выполнения тестов:

а – Dhrystone (однопоточный) для тестируемых процессоров; б – Linpack (однопоточный) для тестируемых процессоров

В качестве наиболее приемлемой единицы измерения производительности ВС при решении задач обработки тракторной информации о космических объектах было принято решение использовать время выполнения исполняемых программ, предназначенных для решения задач определенного класса.

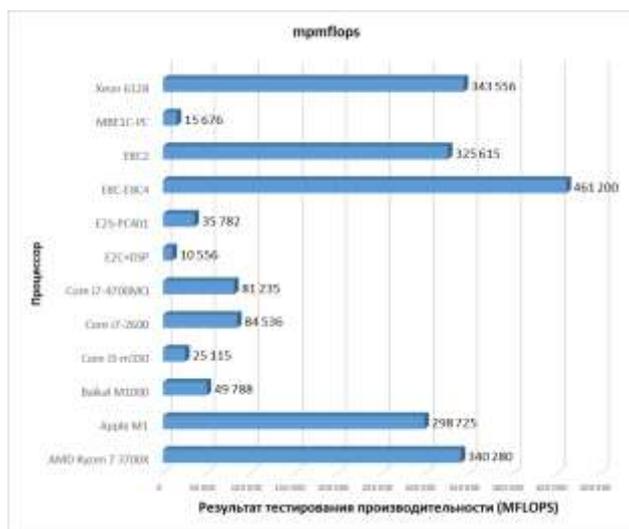


Рис. 7. Результаты выполнения теста mpmflops для тестируемых процессоров

На снижение производительности ВС влияет множество факторов, обусловленных особенностями выбранных алгоритмов решения требуемых задач, их программной реализацией и архитектурой ВС, на которых предполагается реализация программ.

Для успешного прогнозирования потерь производительности ВС необходимо синтезировать функцию, представляющую собой аддитивную свертку значений факторов, оказывающих влияние на производительность с наиболее подходящими весовыми коэффициентами, аппроксимирующую реальные значения потерь производительности, полученные экспериментальным путем.

Пусть имеется некоторая функция $f(\mathbf{B}, \mathbf{X})$, представляющая собой реакцию объекта на воздействие множества факторов \mathbf{X} , снижающих производительность ВС. В рамках задачи

исследования некоторый показатель y является результатом измерений относительной величины затрат производительности ВС при решении задач обработки траекторной информации о космических объектах (выполнении тестовых задач определенного вида).

Представим функцию $f(\mathbf{B}, \mathbf{X})$ как математическую модель, которая аппроксимирует значения y для всех элементов множества X [7]:

$$f(\mathbf{B}, \mathbf{X}) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=j+1}^n b_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (1)$$

Здесь \mathbf{X} – множество факторов, оказывающих воздействие на значение функции (факторы, влияющие на значение величины потерь производительности ВС при решении задач обработки траекторной информации о космических объектах), $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;

\mathbf{B} – искомые параметры модели, $\mathbf{B} = \{b_0, b_1, \dots, b_n \dots b_{12} \dots b_z\}$;

n – количество факторов, влияющих на значение величины потерь производительности ВС при решении задач обработки траекторной информации о космических объектах;

z – количество факторов с учетом их совместного влияния на значение величины потерь производительности ВС.

Необходимо найти такой вектор $\mathbf{B}^* = (b_0, b_1, b_2, \dots, b_{12}, \dots, b_{123}, \dots, b_z)$, чтобы модуль отклонения реально измеренного значения потерь производительности ВС от рассчитанного с помощью математической модели был минимальным.

Значения функции $f(\mathbf{B}, \mathbf{X})$ могут быть рассчитаны с помощью выражения (1) с использованием значений коэффициентов $\mathbf{B} = \{b_0, b_1, \dots, b_n \dots b_{12} \dots b_z\}$.

Таким образом, математическая постановка задачи исследования имеет вид

$$\mathbf{B}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{B} \in R} (|y - f(\mathbf{B}, \mathbf{X})|). \quad (2)$$

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Исследованию причин, снижающих производительность ВС, посвящено большое количество работ [1, 2, 5–7, 9, 11, 13, 19, 22–24]. Анализ литературы показал наличие более 60 факторов, оказывающих влияние на производительность ВС, наиболее значимыми из которых являются:

- технические характеристики процессора;
- особенности организации ввода/вывода данных;
- техническая и алгоритмическая возможность параллельных вычислений;
- использование компилируемых (интерпретируемых) языков программирования и др.

Проведение вычислительного эксперимента с учетом такого большого числа факторов представляет собой сложную вычислительную задачу и может потребовать значительного количества времени. Например, проведение полного факторного эксперимента с попыткой посчитать вклад в снижение производительности ВС с учетом каждого из шестидесяти факторов потребует проведение 2^{60} экспериментов. Таким образом, необходимо сократить размерность вычислительной задачи, уменьшив количество учитываемых факторов. Это можно сделать, проведя факторный анализ и сгруппировав факторы, влияющие на производительность вычислительных систем.

Для решения данной задачи целесообразно использование метода главных компонент.

Применение метода главных компонент позволило объединить факторы, влияющие на производительность ВС, в зависимости от их природы в группы (рис. 8).



Рис. 8. Основные группы факторов, влияющих на производительность ВС

Далее представлены более подробные характеристики описанных выше факторов.

1. **Архитектура процессора** характеризуется типом вычислительных ядер, их тактовой частотой, составом команд, реализацией конвейера и определяет физическую возможность использования параллельных вычислений, а также использования векторизации вычислений.

2. **Особенности работы подсистемы памяти ВС** определяют время, которое ВС будет тратить на загрузку/выгрузку данных из подсистемы памяти (основной, кэш-памяти, регистрового файла) в регистры процессора.

3. **Характеристики устройств хранения данных** определяют время, которое ВС будет тратить на загрузку/выгрузку данных из внешней памяти с учетом задержек в файловой системе, наличия/отсутствия кэширования данных, а также метода обращения к устройствам хранения данных (предварительная выборка, упреждающее чтение, прямой и низкоуровневый ввод/вывод, неблокирующий ввод/вывод).

4. **Оптимальность программного кода приложений.** При разработке программ следует выбирать алгоритмы и структуры данных, подходящие для решаемой задачи, при этом программисту необходимо следить, чтобы в число выбранных алгоритмов не попали алгоритмы, имеющие асимптотически низкую производительность. Следует не допускать чрезмерное увеличение количества обращений к функциям, поскольку это влечет дополнительные потери производительности ВС, связанные с организацией стека (формирование записей активации, загрузка/выгрузка данных и др.) и, по возможности, выносить вычисления за пределы циклов. При разработке программ необходимо следить за использованием объектов в памяти ВС. Следует использовать временные переменные для хранения промежуточных результатов, а массивы или глобальные переменные использовать для хранения только окончательного результата вычислений. Необходимо избегать неразвернутых циклов, поскольку это может привести к увеличению времени на обслуживание циклов и невозможности применения других оптимизаций.

5. **Используемый способ трансляции программного кода.** Данная группа факторов определяет потери производительности ВС, связанные с особенностями функционирования приложений, разработанных с использованием различных типов языков программирования (языки программирования низкого уровня, языки программирования высокого уровня, компилируемые языки программирования, интерпретируемые языки программирования, виртуальные машины, использование сборщиков мусора и др.).

6. **Степень параллелизма программного кода.** Если алгоритм обладает высоким уровнем параллелизма, то при его реализации в виде программы на многопроцессорной вычислительной системе следует использовать многопоточные вычисления. Как правило, при работе с большими объемами данных и вычислений это может принести выигрыш в производительности при решении определенного класса задач.

ОЦЕНИВАНИЕ ПОТЕРЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Основой для измерения производительности ВС служит временной показатель. Но при оценке производительности ВС важное значение имеет так называемое «чистое» процессорное время, определяемое как период функционирования процессора при выполнении задания, и время ответа, включающее выполнение операций ввода/вывода, работу операционной системы и др. Большинство современных процессоров используют генераторы тактовых импульсов. Таким образом, процессорное время может быть определено как общее количество тактов синхронизации при выполнении той или иной программы, умноженное на длительность такта.

Для комплексного анализа производительности многопроцессорных ВС используются наборы синтетических тестов (Dhrystone, LINPACK, «Ливерморские циклы»), позволяющих получать значения в различных единицах измерения (MIPS, MFLOPS, MAC и др.) [23], но в данной работе будет использован другой подход: для каждой выявленной группы факторов, снижающих производительность ВС, будет разработана тестирующая программа на языке программирования C++, позволяющая вычислить время решения задачи с учетом и без учета воздействия выявленного фактора.

В качестве программного обеспечения для проведения вычислительного эксперимента будет использоваться программная реализация алгоритма LUP-разложения матриц и алгоритма быстрого преобразования Фурье, поскольку в данных алгоритмах реализованы наиболее типичные операции, лежащие в основе функционирования АС, решающих задачи обработки траекторной информации о космических объектах.

Для проведения вычислительного эксперимента были выбраны группы факторов, перечисленные выше.

Для исследования влияния *первой группы* факторов тестирующая программа запускалась на ЭВМ, имеющих значительные отличия в технических характеристиках (таких как число активных ядер/потоков, их таковая частота и др.)

Для исследования влияния *второй группы* факторов было осуществлено варьирование размером входных данных для тестирующей программы, поскольку данный параметр напрямую связан с характеристиками подсистемы памяти и оказывает влияние на производительность ВС.

Для исследования влияния *третьей группы* факторов было организовано активное взаимодействие тестирующей программы с внешними запоминающими устройствами путем циклического чтения/записи обрабатываемых данных в файл.

Для исследования влияния *четвертой группы* факторов была выполнена компиляция текста программы с различными оптимизирующими опциями компилятора g++, измерено значение производительности полученных исполняемых файлов.

Для оценивания влияния *пятой группы* факторов было проведено исследование производительности ВС при исполнении тестирующей программы с использованием виртуальной машины (wsl).

Для оценивания влияния *шестой группы* факторов было проведено исследование производительности ВС при исполнении тестирующей программы, запущенной в однопоточном и многопоточном режимах.

Для исследования влияния шести групп факторов, снижающих производительность ВС, необходимо получить 64 значения ($2^6 = 64$) функции отклика (затрат производительности ВС при выполнении тестовой программы). Для автоматизации данной процедуры был разработан скрипт на языке командной оболочки bash, результаты просчетов были сохранены в csv-файл для удобства дальнейшей обработки.

В качестве показателей, характеризующих производительность ВС (потери производительности ВС) [1, 7, 16], примем следующие значения:

1) номинальное время $t_{\text{ном}}$ – время выполнения тестовой программы при минимально возможном воздействии факторов, снижающих производительность ВС;

2) системное время $t_{\text{сист}}$ – время выполнения тестовой программы с учетом воздействия факторов, снижающих производительность ВС;

3) номинальную производительность ВС $p_{\text{ном}}$ – величину, обратную времени выполнения тестовой программы при минимально возможном воздействии факторов, снижающих производительность ВС,

$$p_{\text{ном}} = \frac{1}{t_{\text{ном}}};$$

4) системную производительность ВС $p_{\text{сист}}$ – величину, обратную времени выполнения тестовой программы с учетом факторов, снижающих производительность ВС,

$$p_{\text{сист}} = \frac{1}{t_{\text{сист}}};$$

5) абсолютную величину затрат производительности ВС $\Delta p_{\text{абс}}$ – неотрицательную величину, равную разности номинальной и системной производительности,

$$\Delta p_{\text{абс}} = p_{\text{ном}} - p_{\text{сист}};$$

6) относительную величину затрат производительности ВС $\Delta p_{\text{отн}}$ – величину, равную отношению абсолютной величины затрат производительности ВС к величине номинальной производительности ВС,

$$\Delta p_{\text{отн}} = \frac{\Delta p_{\text{абс}}}{p_{\text{отн}}}.$$

Результаты тестовых просчетов представлены на рис. 9–12.

На рисунках введены следующие обозначения:

«1» – наличие фактора, снижающего производительность;

«-1» – отсутствие фактора, снижающего производительность.

Следует обратить внимание, что на рисунках представлены результаты не всех 64 экспериментов, а результаты просчетов с прореживанием в 4 раза для более удобной визуальной интерпретации результатов.

По своей сути величина $\Delta p_{\text{отн}}$, рассчитанная при выполнении тестовой программы, является значением исследуемой функции потерь производительности (обозначенная y) в каждом испытании (эксперименте), т. е. $y_i = (\Delta p_{\text{отн}})_i, i = \overline{1, 2^n}$. Здесь n – количество факторов (групп факторов), влияющих на производительность ВС при решении задач обработки траекторной информации о космических объектах.

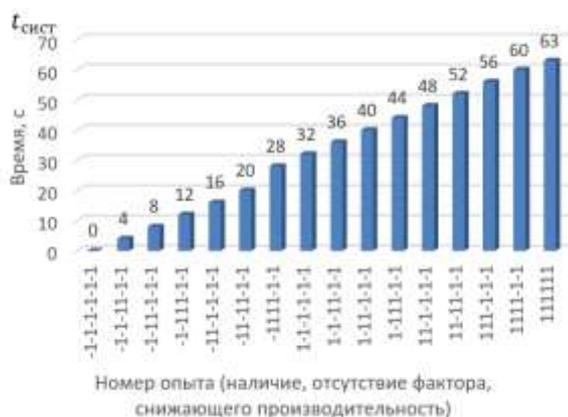


Рис. 9. Время выполнения тестирующей программы

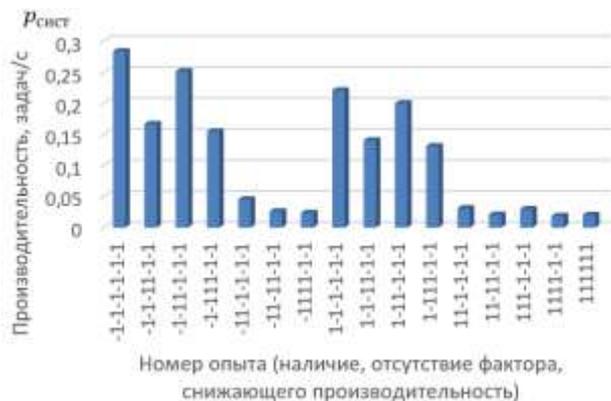


Рис. 10. Производительность вычислительной системы при выполнении тестирующей программы

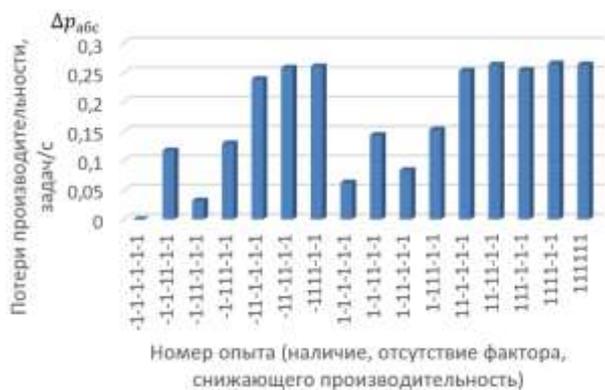


Рис. 11. Абсолютное значение потерь производительности вычислительной системы при выполнении тестирующей программы

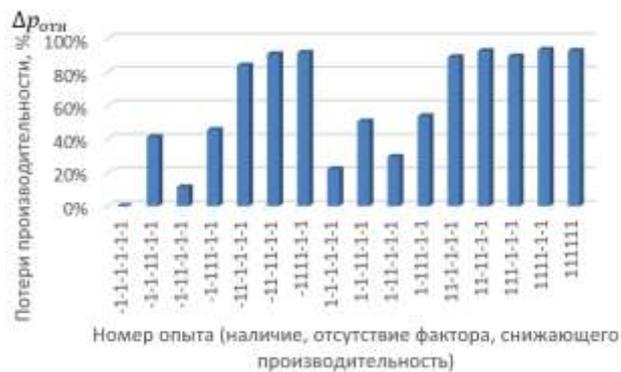


Рис. 12. Относительное значение потерь производительности вычислительной системы при выполнении тестирующей программы

Для построения линейной функции зависимости потерь производительности вычислительной системы от определенных факторов необходимо провести полный факторный эксперимент.

Порядок учета факторов представлен в табл. 3.

Таблица 3

Порядок учета факторов, снижающих производительность ВС при обобщении результатов вычислительного эксперимента

Название фактора	Варианты кодирования
Архитектура процессора	-1 – улучшенные характеристики процессора 1 – стандартные характеристики процессора
Особенности работы подсистемы памяти ВС	-1 – использование памяти верхнего уровня 1 – использование памяти нижних уровней
Характеристики устройств хранения данных	-1 – отсутствие обращений к жесткому диску 1 – наличие обращений к жесткому диску
Оптимальность программного кода приложений	-1 – оптимизированный код программы 1 – неоптимизированный код программы
Используемый способ трансляции программного кода	-1 – без использования технологий виртуализации 1 – использование технологий виртуализации
Степень параллелизма программного кода	-1 – многопоточный режим 1 – однопоточный режим

Далее сформируем таблицу «Матрица полного факторного эксперимента». Для этого в каждой строке запишем комбинации уровней факторов для каждой экспериментальной точки. Полный факторный эксперимент дает возможность отдельно определить не только коэффициенты регрессии, соответствующие линейным эффектам, но и коэффициенты регрессии, соответствующие всем эффектам взаимодействия.

Для оценки свободного члена b_0 (ожидаемого отклика в центре плана) и определения эффектов взаимодействия $b_{12}, b_{13}, \dots, b_{123}, \dots$ план эксперимента расширяют до так называемой матрицы планирования добавлением соответствующего «фиктивной переменной» единичного столбца x_0 и столбцов произведений $x_1x_2, x_1x_3, \dots, x_1x_2x_3x_4x_5x_6$.

В последний столбец запишем значение функции y (потери производительности, полученные экспериментальным путем).

Матрица полного факторного эксперимента в сокращенном виде представлена в табл. 4.

Таблица 4

Матрица полного факторного эксперимента

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	...	$x_2x_3x_4x_5x_6$	$x_1x_2x_3x_4x_5x_6$	Значение y
1	+1	-1	-1	-1	-1	...	-1	+1	0
2	+1	-1	-1	-1	-1	...	+1	-1	0,000805
3	+1	-1	-1	-1	-1	...	+1	-1	0,003822
4	+1	-1	-1	-1	-1	...	-1	+1	0,004683
...
63	+1	+1	+1	+1	+1	...	-1	-1	0,26253
64	+1	+1	+1	+1	+1	...	+1	+1	0,263527

Значения весовых коэффициентов групп факторов рассчитываются с помощью выражения

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}y_u}{N}, i = \overline{1, 2^n}, \quad (3)$$

где x_{iu} – величина, расположенная на пересечении i -го столбца и u -й строки матрицы планирования и в случае двухуровневого полного факторного эксперимента равная +1 или -1;

N – число опытов полного факторного эксперимента (в данном случае $N = 64$).

Значения весовых коэффициентов групп факторов представлены в табл. 5.

Таблица 5

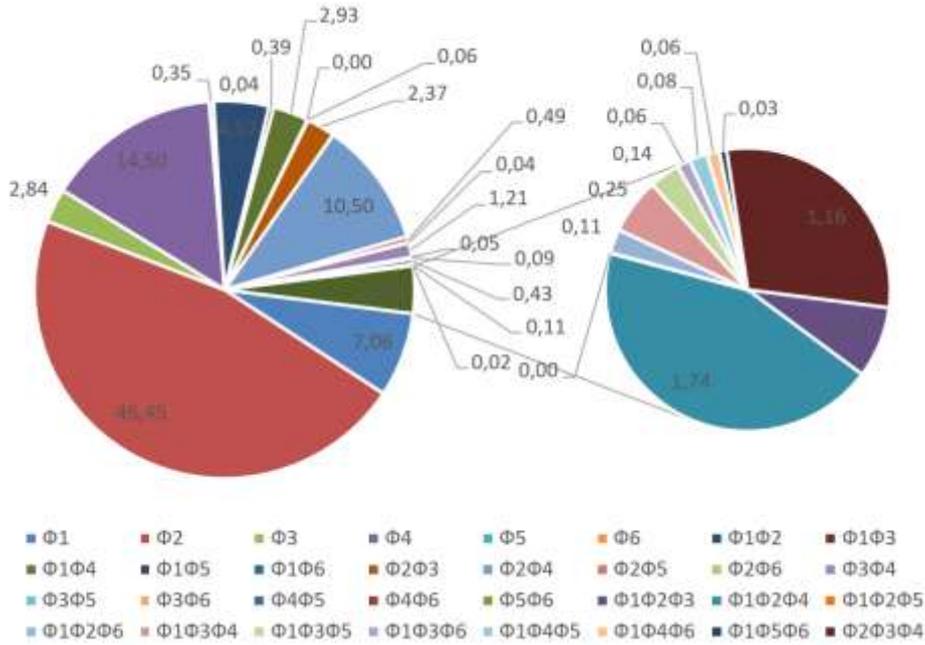
Значения весовых коэффициентов групп факторов

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_{12}
0,173	0,013	0,081	0,005	0,026	0,001	0,000	-0,008
b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}
-0,001	-0,005	0,000	0,000	-0,004	-0,019	-0,001	0,000
b_{34}	b_{35}	b_{36}	b_{45}	b_{46}	b_{56}	b_{123}	b_{124}
-0,002	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,003
b_{125}	b_{126}	b_{134}	b_{135}	b_{136}	b_{145}	b_{146}	b_{156}
-0,00001	-0,00019	0,00045	0,00025	0,00011	-0,00014	-0,00010	0,00006
b_{234}	b_{235}	b_{236}	b_{245}	b_{246}	b_{256}	b_{345}	b_{346}
0,00207	-0,00028	0,00023	0,00047	-0,00019	0,00006	-0,00046	0,00030
b_{356}	b_{456}	b_{1234}	b_{1235}	b_{1236}	b_{1245}	b_{1246}	b_{1256}
0,00003	0,00004	-0,00034	-0,00020	-0,00012	0,00004	0,00016	-0,00008
b_{1345}	b_{1346}	b_{1356}	b_{1456}	b_{2345}	b_{2346}	b_{2356}	b_{2456}
-0,00008	-0,00012	0,00007	-0,00010	0,00030	-0,00022	0,00007	0,00003
b_{3456}	b_{12345}	b_{12346}	b_{12356}	b_{12456}	b_{13456}	b_{23456}	b_{123456}
0,00006	0,00007	0,00011	-0,00009	0,00009	-0,00006	0,00001	0,00006

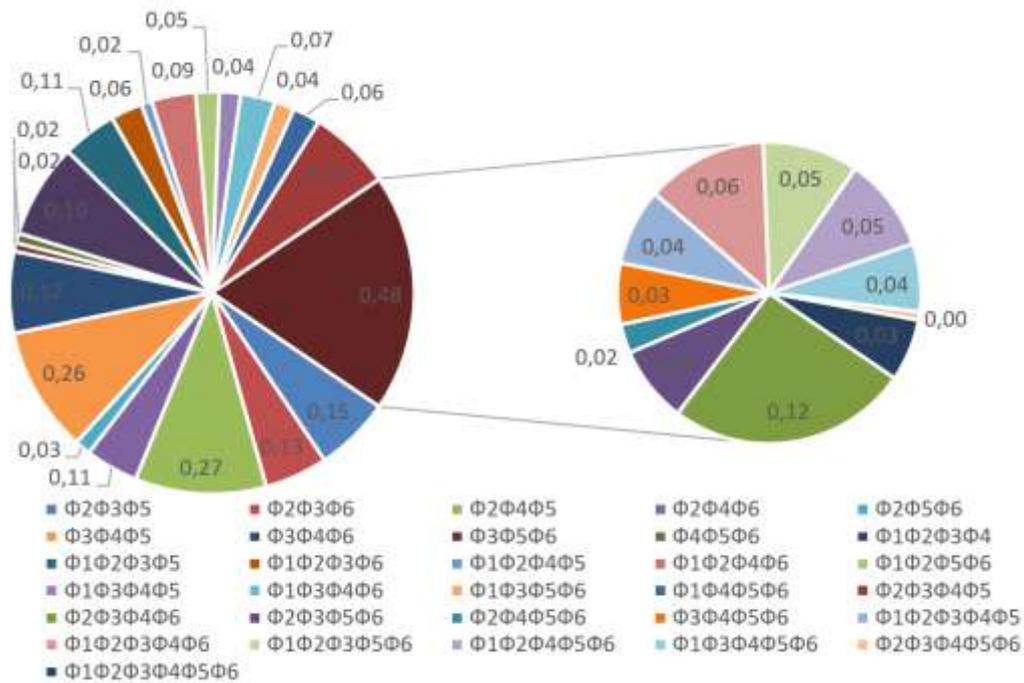
Вклады d_i каждой группы факторов в отдельности и их совместное влияние на снижение производительности системы рассчитаны с помощью выражения

$$d_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^N b_i}, i = \overline{1, 2^n} - 1 \quad (4)$$

и представлены на рис. 13.



а)



б)

Рис. 13. Вклад каждой группы факторов в снижение производительности вычислительной системы, в %:
 а – факторы Ф1–Ф2Ф3Ф4; б – факторы Ф2Ф3Ф4Ф5–Ф1Ф2Ф3Ф4Ф5Ф6

Очевидно, наибольшее влияние на снижение производительности системы оказывают группы факторов (по убыванию значимости) № 2 (45,45%), № 4 (14,5%), № 1 (7,06%) и № 3 (2,84%), влияние групп факторов № 5 (0,35%) и № 6 (0,04%) на снижение производительности системы незначительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований было выявлено множество факторов, оказывающих влияние на потери производительности вычислительных систем, осуществлена их группировка и рассчитаны значения степени их влияния на результирующий показатель.

Полученное аналитическое выражение позволяет прогнозировать значение потерь производительности в зависимости от типа и сложности решаемых задач по обработке траекторной информации о космических объектах, а также архитектуры применяемых вычислительных средств.

Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации структуры вычислительной системы и проверке программного обеспечения:

- количественное значение предполагаемых потерь производительности позволяет провести анализ функционирования системы. Результаты расчетов дают конкретные числовые значения, которые можно использовать для сравнения различных настроек или для оценивания эффективности изменений в программном коде;
- определение оптимальных значений параметров системы, таких как объем оперативной памяти или тактовая частота процессора, для эффективного решения вычислительных задач. Это помогает достичь оптимальной производительности при минимальных затратах на ресурсы;
- выявление возможных ошибок или критических участков программного кода;
- выбор оптимальной архитектуры системы для решения конкретных задач;
- организация планирования распределения ресурсов.

Использование полученных результатов на этапе проектирования, создания и эксплуатации современных ВС, решающих задачи обработки траекторной информации о космических объектах, позволит провести количественный анализ потерь производительности, оптимизировать систему и выявить ошибки или критические места программного обеспечения, что, в свою очередь позволит обеспечить требуемые результаты качества функционирования ВС – выполнить требования режима жесткого реального времени и объемов одновременно обрабатываемых данных во избежание пропуска целей, завязки ложных траекторий и неверного определения типов объектов.

Список используемых источников

1. Параллельная обработка информации : в 5 т. / А. И. Аксенов [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1984. – Т. 5 : Проблемно-ориентированные и специализированные средства обработки информации. – 502 с.
2. *Анфилатов В. С., Емельянов А. А., Кукушкин А. А.* Системный анализ в управлении : учеб. пособие / под ред. А. А. Емельянова. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
3. Основы высокопроизводительных вычислений : учеб. пособие : в 2 т. / К. Е. Афанасьев [и др.]. – Кемерово : Изд-во КГУ, 2011. – Т. 1 : Высокопроизводительные вычислительные системы. – 228 с.
4. *Байков Н. Д., Годунов А. Н.* Сравнение производительности отечественных и импортных микропроцессоров // Программные продукты и системы. – 2017. – Т. 30, № 3. – С. 409–419.
5. *Брендан Г.* Производительность систем. – СПб. : Питер, 2023. – 992 с.
6. *Бувайло Д. П., Толоч В. А.* Распределенные вычисления : учеб. пособие. – Запорожье : ЗГУ, 2002. – 63 с.
7. *Карцев М. А.* Структура вычислительных систем и их эффективность при решении разных классов задач. – М., 1977. – 14 с.
8. Оценка производительности вычислительных систем / Е. Ю. Климанова [и др.] // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 24. – С. 102–105.

9. *Ключев А. О., Антонов А. А.* Измерение производительности компонентов подсистемы памяти для гетерогенных систем на кристалле // Программные продукты и системы. – 2016. – Т. 29, № 4. – С. 78–84.
10. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен [и др.]; под ред. И. В. Красикова. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2005. – 1296 с.
11. *Костров Б. В., Мартышкин А. И.* Исследование структурной организации и оценка производительности многопроцессорных вычислительных систем с общей шиной // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – Вып. 2. – С. 152–162.
12. *Кузьмин С. З.* Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. – М. : Сов. радио, 1974. – 432 с.
13. *Ледянкин И. А.* К вопросу повышения производительности многопроцессорных кластерных вычислительных систем // Научное обеспечение космических исследований Земли. – 2014. – Вып. 4. – С. 28–34.
14. *Петухов Г. Б., Якунин В. И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М. : АСТ, 2006. – 506 с.
15. *Попов Д. Г., Антонов Д. А.* Задачи комплексной оценки системной производительности вычислительных комплексов космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Молодые ученые России : сб. ст. XV Всерос. научно-практ. конф. – Пенза : Наука и Просвещение, 2022. – С. 17–25.
16. *Попов С. Б.* Моделирование информационной структуры параллельной обработки изображений // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 231–242.
17. *Саврасов Ю. С.* Алгоритмы и программы в радиолокации. – М. : Радио и связь, 1985. – 216 с.
18. *Сологий А.* Большое тестирование процессоров различных архитектур. – URL: https://habr.com/ru/companies/icl_group/articles/501588/ (дата обращения: 06.03.2024).
19. Методы оценки производительности вычислительных комплексов / С. А. Сорокин [и др.] // Научные ведомости. Сер.: Экономика. Информатика. – 2017. – № 9(258), вып. 42. – С. 89–96.
20. *Тыртышников Е. Е.* Матричный анализ и линейная алгебра. – М. : Физматлит, 2007. – 480 с.
21. *Французов Д.* Оценка производительности вычислительных систем // Открытые системы. СУБД. – 1996. – Вып. 2. – URL: <https://www.osp.ru/os/archive/1996/02> (дата обращения: 06.03.2024).
22. Computer Performance Essay. – URL: https://academic-master.com/computer-performance-essay/#Aspects_of_Performance (дата обращения: 06.03.2024).
23. *Ramasubramanian N., Srinivas V. V., Gounden N. Ammasai* Performance of cache memory subsystems for multicore architectures // International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCSSEA). – 2011. – Vol. 1, № 5. – P. 59–71.
24. Top 10 Factors That Affect Computer Performance. – URL: <https://phoenixite.com/top-10-factors-that-affect-computer-performance/> (дата обращения: 06.03.2024).

Д. В. Нагибин;
А. А. Платонов,
кандидат технических наук;
В. Ю. Руссу;
Т. Р. Сабиров,
кандидат технических наук

МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ДВОИЧНОГО КОДА ПРОГРАММ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В статье предлагается подход к исследованию программ путем применения модели анализа двоичного кода программ на основе методов машинного обучения. Создание модели осуществляется с помощью последовательного преобразования двоичного кода программ от разнообразных форм представления (абстрактного синтаксического дерева, структур токенов и инструкций) до наборов данных (метрик форм представления) и создание на их основе моделей машинного обучения.

Ключевые слова: программное обеспечение, алгоритмы машинного обучения, модели машинного обучения.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ двоичного кода (АДК) имеет решающее значение в различных задачах разработки программного обеспечения, таких как обнаружение вредоносных программ, рефакторинг кода и обнаружение плагиата. С увеличением сложности программного обеспечения и разнообразием вычислительных платформ двоичный анализ становится критически важным. Традиционные методы анализа двоичного кода имеют ряд недостатков, включая необходимость кроссплатформенного анализа, низкую масштабируемость и скорость.

В связи с этим некоторые подходы к решению задач анализа двоичного кода на основе машинного обучения привлекают значительное внимание из-за их автоматизированного извлечения функций и резкого сокращения усилий, необходимых для анализа крупномасштабных программ. В работе [2] впервые представлен метод на основе нейросетей для распознавания вируса в двоичных файлах приложений. После публикации этого исследования количество работ в области анализа исполняемых файлов методами машинного обучения стало резко увеличиваться, как правило, они посвящены исследованиям в поиске дефектов и уязвимостей ПО, распознаванию специфических функций и т. д.

ПРОБЛЕМНАЯ СИТУАЦИЯ

Анализ двоичного кода позволяет напрямую осуществлять анализ двоичных исполняемых файлов. Он широко используется в областях, где доступность исходного кода ограничена, например:

- исследовании проприетарного программного обеспечения (ПО);
- рефакторинга устаревших программ или ПО, исходный код которого был утерян;
- обнаружении уязвимостей и программных закладок после процессов компиляции и оптимизации ПО;
- обнаружении плагиатных программ (участков кода) и т. д.

Устаревшие программные двоичные файлы существуют во многих производственных системах, например, в аэрокосмической отрасли, военных и банковских сферах. Для обнаружения ошибок или анализа безопасности программной системы очень часто исполняемые двоичные коды являются единственным источником информации, который отражает содержимое и поведение программ. Процессы компиляции, связывания и оптимизации, которые

выполняются в ходе разработки и реализации ПО, могут привести к значительным различиям в поведении программы по сравнению с ее исходным кодом. Все это подчеркивает актуальность АДК в современных условиях.

Анализировать двоичные исполняемые файлы в чистом виде, в отличие от исходного кода, достаточно трудно. Это обусловлено следующими факторами:

- задача восстановления полного исходного кода, а соответственно, семантической составляющей, из разнообразных форм представления исполняемого кода является трудноразрешимой;
- коммерческое программное обеспечение, операционные системы применяют различные методы защиты программ и данных в них (обфускация, упаковка, шифрование и т. д.) для того, чтобы затруднить реинжиниринг и нелегальное использование программ;
- общедоступные системные библиотеки, различные инструменты в виде фреймворков часто оптимизируются для того, чтобы снизить требования к пространству памяти, это влечет за собой потерю отладочной и символьной информации.

Для АДК, как и для анализа исходных кодов, часто применяют устоявшиеся методы статистического и динамического анализа программ.

В области обнаружения уязвимостей ПО с помощью статического анализа двоичного кода было проведено множество исследований для определения схожести кода с уже известными уязвимостями. В работе [3] было показано, как можно использовать основанные на сходстве методы бинарного обнаружения уязвимостей с учетом кросс-архитектуры. Для этой цели был проанализирован двоичный код для архитектур центральных процессоров (ЦП) ARM, MIPS и x86, который был преобразован в промежуточное представление, а затем на основе этого представления были рассчитаны показатели сходства для разных образцов архитектур.

Еще одним методом обнаружения на основе сходства, не требующим использования исходного кода, является Discover [6]. Этот инструмент использует алгоритм k -ближайших соседей для выявления похожих функций на основе числовых признаков, а затем фильтрует их на основе схожести графиков управления потоками. Особенностью этой работы является оперативность инструмента, который может проверить более 130 000 функций за 80 миллисекунд.

Ключевым недостатком статистических методов, направленных на фильтрацию релевантных участков кода на основе графа управления, является то, что даже незначительное изменение в потоке управления делает обнаружение таких участков практически невозможным, повышается количество ошибок первого и второго родов.

Для поиска уязвимостей при динамическом анализе популярным методом является фаззинг. Одной из проблем при данном виде тестирования считается корректный подбор входных данных. Такой подбор как раз можно улучшить с помощью методов машинного обучения.

В качестве основных и трудноразрешимых проблем, с которыми сталкиваются статистические и динамические методы при АДК, можно выделить следующие:

1) эти методы далеки от универсальности, каждый из них, как правило, подбирается для определенной платформы и специального ПО. Кроссплатформенность для них становится проблемной задачей;

2) объем ПО и скорость его обработки является для этих методов жестким ограничением, что также влияет на их использование в режиме времени, близком к реальному, и даже хотя бы отдаленно приближенному к нему режиму.

3) точность методов статического и динамического анализов ПО существенно падает в зависимости от отдаления исследуемого ПО от экспериментальной выборки.

Для решения данных проблем необходимо использование методов машинного обучения.

СИСТЕМА АНАЛИЗА ДВОИЧНОГО КОДА НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Методы машинного обучения помогают преодолеть трудности обработки исполняемого кода, описанные выше. На уровне исходного кода было развернуто несколько платформ анализа этого кода на основе машинного обучения, которые используют методы обработки естественного языка. Например, в работе [4] авторы предлагают метод обнаружения похожих участков кода в исходном языке программирования высокого уровня на основе рекурсивной нейронной сети (RNN – *Recursive Neural Network*).

Система анализа машинного кода на основе машинного обучения представлена на рис. 1.

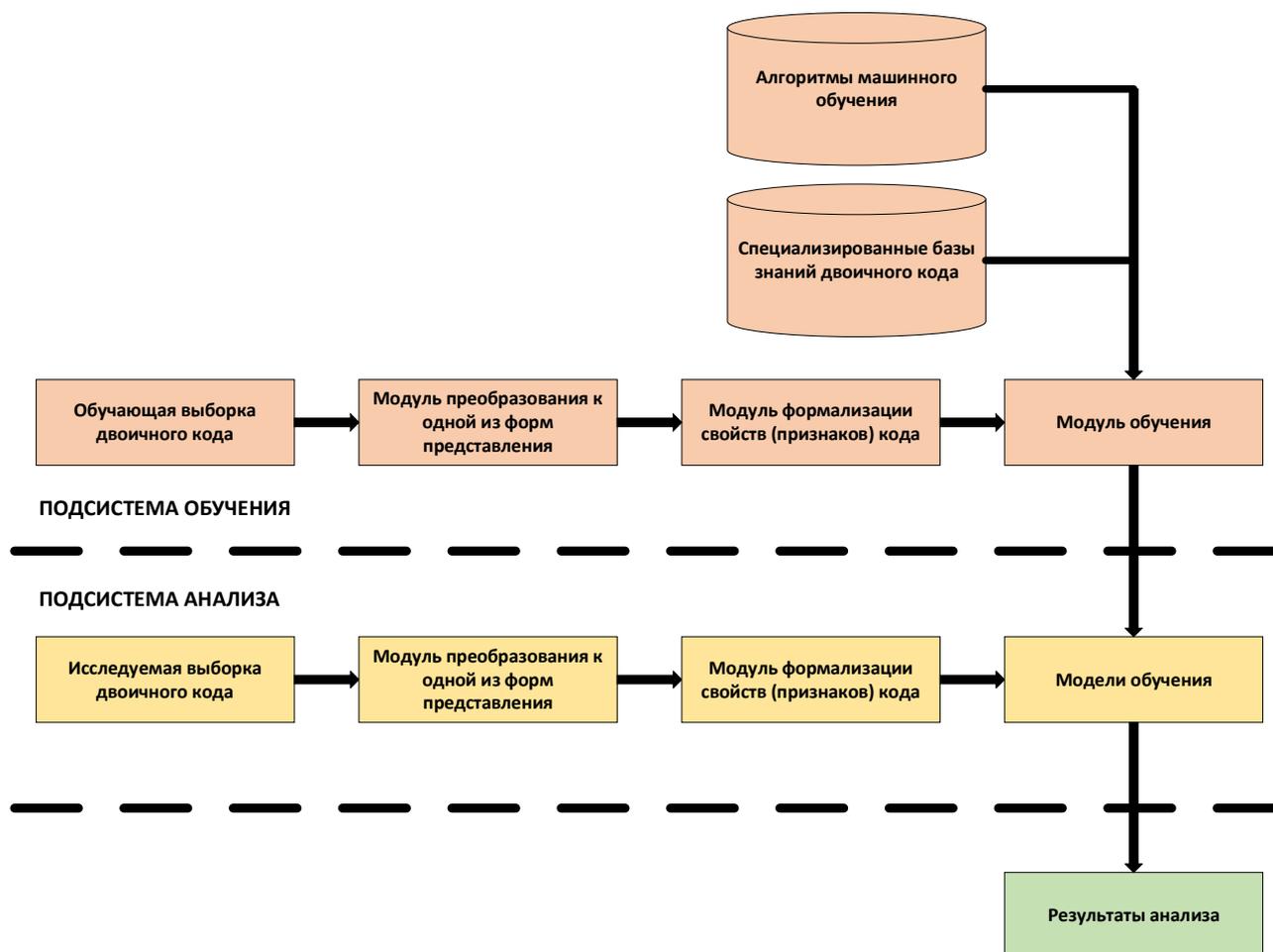


Рис. 1. Система АДК на основе машинного обучения

Система анализа состоит из двух подсистем, основной из которых является подсистема обучения, состоящая из нескольких модулей:

1) **модуль преобразования к одной из форм представления двоичного кода** предназначен для отображения этого кода в удобный вид для дальнейшей обработки. Преобразование двоичного кода осуществляется, как правило, с помощью лексического и динамического анализаторов;

2) **модуль формализации свойств (признаков) кода**. Данный модуль используется для выделения (формализации) необходимых свойств (признаков) из полученного после первого модуля специфического вида двоичного кода и приведение этих свойств к набору данных, удобному для обработки с помощью алгоритмов машинного обучения.

3) **модуль обучения.** На вход модуля поступает набор данных (обучающая выборка), который обрабатывается с помощью разнообразных алгоритмов обучения. Кроме того, обработка ведется на основе специализированных баз знаний (баз данных) двоичного кода, например, SARD (*Software Assurance Reference Dataset*), CWE (*Common Weakness Enumeration*), CVE (*Common Vulnerabilities and Exposures*) и т. д.

В результате работы подсистемы обучения получают различные модели обучения, которые используются уже в подсистеме анализа для решения задач, поставленных перед системой АДК. Остальные модули в подсистеме анализа выполняют функции, схожие с модулями подсистемы обучения.

Модели обучения различаются между собой по различным критериям (точность, скорость, пригодность и т. д.). Эти критерии в моделях будут варьироваться в зависимости от разнообразных входных выборок двоичного кода.

МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ДВОИЧНОГО КОДА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Исходя из представленной выше системы АДК на основе машинного обучения, предлагается модель АДК на основе методов машинного обучения, отображенная на рис. 2.

Данная модель состоит из трех уровней:

1. **Представление свойств.** В отличие от использования машинного обучения в задачах обработки исходных кодов программ, оптимизированные двоичные коды содержат огромное количество терминальных и сложносоставных блоков (участков кода), которые имеют сложные отношения и меньшую избыточность. На этом уровне производится выявление блоков из двоичного кода и их представление в том или ином виде. В качестве таких терминальных блоков могут использоваться инструкции или токены языка ассемблер, а также просто двоичные последовательности. Основной задачей этого уровня является выделение свойств (признаков) двоичного кода путем разнообразных форм представления двоичного файла [1]:

а) свойства на основе графа. Двоичные файлы программы могут быть представлены в виде разнообразных форм графов, в том числе графа потока управления (ГПУ, CFG – *control flow graph*). Такой граф для извлечения объектов на основе графов используется в различных работах [5–7].

б) свойства на основе кода. Выделение свойств также можно осуществлять непосредственно из необработанного двоичного кода. В этом случае разделяют выделение свойств на два способа:

– *свойства на основе токенов.* Токен – это минимальная единица синтаксиса языка программирования. Код программы состоит из токенов, которые представляют ключевые слова, идентификаторы, операторы, скобки и другие элементы. Для извлечения токенов из двоичного кода используются дизассемблеры, такие как IDA Pro, Sourcer, Radare2, Ghidra, а также декомпиляторы – JAD, FernFlower;

– *свойства на основе инструкций.* Каждая команда машинного уровня в двоичных исполняемых файлах представляет собой уникальную комбинацию маркеров, включающую в себя инструкции, адреса памяти, регистры и непосредственные значения. Такая последовательность команд может быть использована в качестве программных функций для анализа программных ошибок, информационных потоков и т. д. [8].

2. **Формализация свойств.** Извлеченные из двоичного кода необработанные терминальные блоки не могут быть переданы в модуль машинного обучения напрямую. Поскольку в основе любого алгоритма машинного обучения лежат наборы числовых данных (*dataset*), то необходимо преобразовать эти терминальные блоки в вектора свойств с использованием некоторых формальных правил. Таким образом, основная задача на этом уровне заключается

в том, чтобы преобразовать свойства кода из форм представления в вектора свойств по некоторым формальным правилам.

3.Обучение на основе свойств. После извлечения объектов и формализации свойств осуществляется выбор алгоритма машинного обучения для дальнейшего анализа программы.

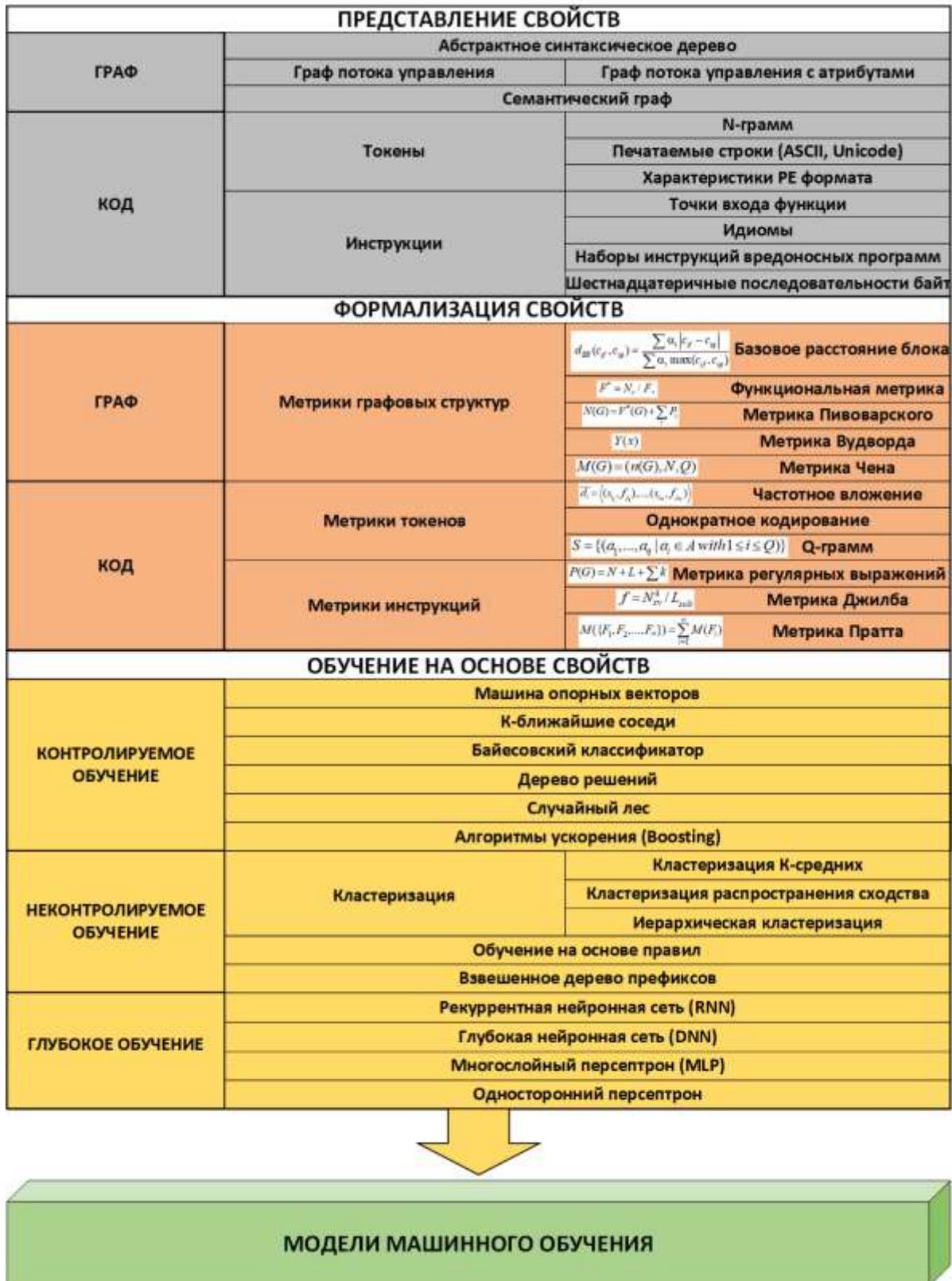


Рис. 2. Модель АДК на основе машинного обучения

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ДВОИЧНОГО КОДА

Существуют две основные формы представления свойств двоичного кода [1].

1. **Граф.** Двоичные файлы программы могут быть представлены в виде разнообразных графов программы:

– *абстрактное синтаксическое дерево* (АСД) отражает структуру программного кода, а также позволяет анализировать зависимости между переменными и операторами (рис. 3 и 4). В работах [5, 6] используют АСД для анализа синтаксиса на уровне исходного кода;

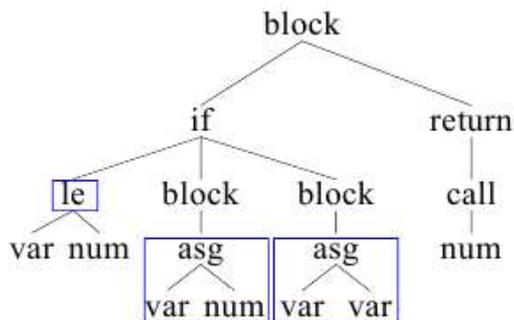


Рис. 3. АСД для x86 платформы

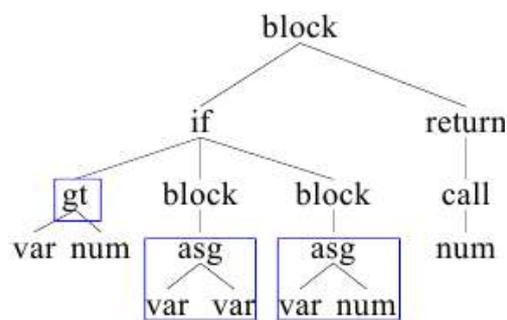


Рис. 4. АСД для ARM платформы

– *граф потока управления* (ГПУ, CFG – *control flow graph*) предназначен для отображения всех возможных путей выполнения программы (рис. 5 и 6). В АДК на основе машинного обучения существует множество исследований, в которых ГПУ используется в качестве входных данных;

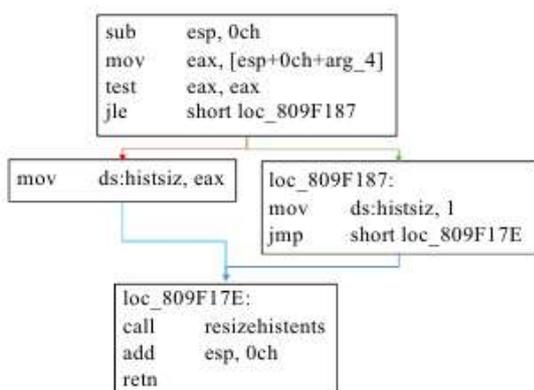


Рис. 5. ГПУ для x86 платформы

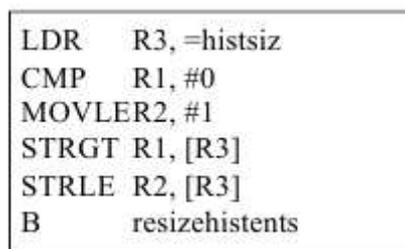


Рис. 6. ГПУ для ARM платформы

– *семантический граф* (СГ, ASG – *abstract semantic graph*) является продуктом слияния ГПУ с графом потока данных и их нормализацией. Этот вид графа предназначен для получения семантических значений и преодоления средств защиты программы в процессе ее исследования.

2. **Код.** Это естественное представление программы, но при этом код разделяют по уровням представления [1]:

1) *токены* – символы, термы или слова, полученные различными способами токенизации двоичного кода для выявления идентификатора, константы, слова, параметра и т. д. В данном случае форма представления двоичного кода будет сильно зависеть от того, что выбрано в качестве токена. На модели АДК (см. рис. 2) отображены формы представления токенов в виде *N*-грамм, печатаемых строк, характеристик PE-файла;

2) *инструкции* – это представление кода программы на более высоком уровне, чем токены, что позволяет осмысленнее отображать различные маркеры (команды, ссылки, регистры, непосредственные значения и т. д.).

Более подробно формы представления свойств двоичного кода рассмотрены в работе [1].

ФОРМАЛИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ДВОИЧНОГО КОДА

Для предоставления свойств двоичного кода в виде числового вектора (эмбейдинг) часто используются метрики графовых структур, токенов и инструкций.

Метрики графовых структур

Граф потока управления описывает поток основных блоков (инструкции и их последовательности) в виде вершин, узлов и дуг. Но вершины, узлы и дуги не могут быть напрямую использованы в виде наборов данных для обучения моделей. Таким образом, необходимо преобразовать эти блоки с сохранением их свойств в векторы установленной длины.

Базовое расстояние блока. В работе [6] вводится концепция под названием *базовое расстояние блока* d_{BB} для обнаружения сходства функций в различных двоичных файлах. Например, если создать базу данных с примерами функций, содержащих уязвимость, то с помощью базового расстояния блока можно находить похожие функции в исполняемых файлах, которые скомпилированы и оптимизированы под разные архитектуры и платформы.

Выбирается функция f из ГПУ, при этом каждый узел (вершина) данной функции обладает различными свойствами F , такими как топологический порядок, строковые ссылки, числовые константы, известные функции, встроенные в данную функцию и т. д. Исходя из этих свойств, базовое расстояние блока определяется как

$$d_{BB}(c_{if}, c_{ig}) = \frac{\sum \alpha_i |c_{if} - c_{ig}|}{\sum \alpha_i \max(c_{if}, c_{ig})}, \quad (1)$$

где α_i – весовая метрика с диапазоном $[0 \dots 100]$ к достижимому $\max(d_{BB}(f_i, g_j) - d_{BB}(f_i, f_j))$;

c_{if}, c_{ig} – числовые особенности $i \in F$ функций f и g , где $f \neq g$.

Другими словами, необходимо максимизировать разницу между одними и теми же разными функциями.

Функциональная метрика. Данная величина рассчитывается на основе сложности вершин ГПУ по формуле

$$F^* = N_c / F, \quad (2)$$

где F – функциональное число, равное сумме приведенных сложностей всех вершин ГПУ:

$$F = \sum_{i=1}^{N_c} c_i,$$

где c_i – сложность i -й вершины (функциональные и объединяющие вершины – собственная сложность, предикатные вершины – сумма всех сложностей вершин, входящих в сферу влияния);

N_c – общее количество вершин.

Метрика Чена. Эта метрика выражает сложность программы с помощью числа пересечений границ между областями памяти, образуемыми ГПУ. Она показывает вложенность различного рода переходов в исполняемом коде и характеризуется выражением

$$M(G) = (n(G), N, Q), \quad (3)$$

где $n(G)$ – цикломатическое число (число МакКейба);
 N – число условных и безусловных переходов;
 Q – общее число вложений каждого оператора перехода.

Графически вложенность оператора *JMP* представлена на рис. 7, а на рис. 2 представлены и другие метрики, которые могут использоваться для формализации свойств на основе графовых структур, кроме того, их количество может пополняться.

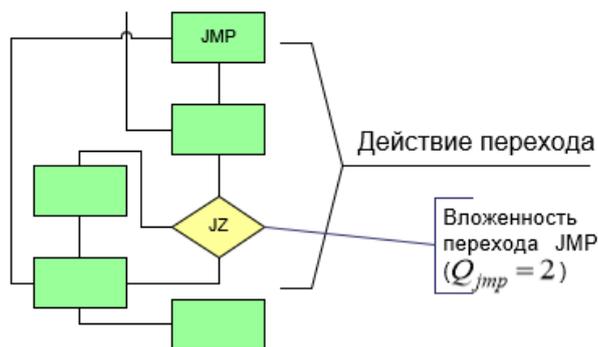


Рис. 7. Вложенность оператора *JMP*

Метрики токенов

Частотное вложение. В работе [9] используется частотное встраивание – перевод коротких фрагментов кода более высокого уровня (исходный код на языке C) в соответствующие байты двоичного кода. После этого формируется рейтинг популярности (первые – N наиболее часто встречающихся токенов в коде), и на основе рейтинга и полученных результатов перевода формируется набор данных, который отражает собой тот или иной токен для рекуррентной нейронной сети. В результате получена рекуррентная нейронная сеть, которая может распознавать токены в двоичном коде, на основе этого строится система декомпиляции. На данном принципе осуществляется большое количество исследований.

Однократное кодирование. Некоторые подходы к анализу двоичного кода напрямую используют необработанные байты, извлеченные из программы. При этом множество моделей машинного обучения не могут работать с необработанными данными.

В работе [10] для формализации двоичных байтов и преобразования их к наборам данных используется метод, называемый однократным кодированием. В этом методе каждый байт

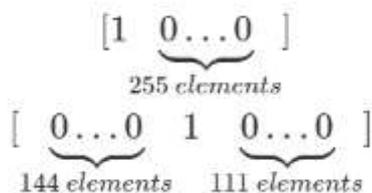


Рис. 8. Кодированные последовательности для байтов *NUL* и *NOP*

будет закодирован как вектор R^{256} и в качестве идентификации байта используется только «1», а любой другой обозначается «0» в каждом векторе. Например, байты *NUL* (0) и *NOP* (144) в архитектуре x86 могут быть представлены в виде последовательностей, представленных на рис. 8.

Q-граммы. В работе [11] используются структуры под названием *Q*-граммы. Формирование этих структур происходит путем извлечения из последовательностей инструкций MIST (набор инструкций вредоносного ПО) – x некоторых данных с длиной Q , которые называются *Q-gram*. Набор *Q*-грамм S можно представить в виде

$$S = \{(a_1, \dots, a_q \mid a_i \in A \text{ with } 1 \leq i \leq Q)\}, \quad (4)$$

где A – набор всех возможных инструкций. Далее множество S преобразуется в $|S|$ -размерный вектор. Функция формализации (преобразования) имеет вид

$$\phi = (\phi(x))_{s \in S}, \quad (5)$$

где

$$\phi_s(x) = \begin{cases} 1, & \text{если участок } x \text{ содержит } Q\text{-граммы,} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Например, если есть участок кода x , содержащий вредоносные действия и соответствующий простой последовательности инструкций $x = \{1 \mid A, 2 \mid A, 1 \mid A, 2 \mid A\}$, где A – это инструкция $MIST A$, то он может быть сформирован двумя упрощенными инструкциями: $A = \{1 \mid A, 2 \mid A\}$. Если порог скользящего окна настроен как $Q = 2$, т. е. только две возможные последовательности инструкций: «1 | A2 | A» или «2 | A1 | A», тогда функция формализации будет выглядеть следующим образом:

$$\phi('1 \mid A2 \mid A1 \mid A2 \mid A') \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} '1 \mid A1 \mid A' \\ '1 \mid A2 \mid A' \\ '2 \mid A1 \mid A' \\ '2 \mid A2 \mid A' \end{matrix}. \quad (7)$$

Чтобы уменьшить смещение результат формализации будет дополнительно нормализован:

$$\phi(x) = \frac{\phi(x)}{\|\phi(x)\|}. \quad (8)$$

После нормализации сходство между двумя участками кода x и z можно вычислить как расстояние $d(x, z)$:

$$d(x, z) = \|\phi(x) - \phi(z)\|. \quad (9)$$

Существует большое количество и других работ по формализации свойств двоичного кода на основе токенов.

Метрики инструкций

Метрика регулярных выражений. Эта метрика учитывает направление и насыщенность потока данных и основана на преобразовании исполняемого кода в регулярные выражения. Пример такого преобразования в табл. 1.

Таблица 1

Регулярные выражения, полученные на основе инструкций

Инструкции	Регулярные выражения
JNZ 004188C4	JNZ CONST
MOV EBX, DWORD PTR DS:[ESI]	MOV EBX, (DS(ESI))
SUB ESI, -4	SUB ESI, CONST
ADD EBX, EBX	ADD EBX, EBX

Данная метрика формирует набор числовых данных (*data set*) для обучения путем расчета числа операндов и операторов инструкций:

$$P(G) = N + L + \sum k, \quad (10)$$

где N – число операндов;
 L – число операторов;
 $\sum k$ – общее число скобок.

Метрика Джилба характеризует насыщенность программы конструкциями условного перехода (JNE, JNZ, JZ и т. д.) и вычисляется по формуле

$$f = N_{sv} / L_{sub}. \quad (11)$$

Некоторые переменные, которые могут использоваться в формуле (11), представлены в табл. 2.

Таблица 2

Переменные для метрики Джилба

Характеристика	Обозначение	Пример
Количество операторов цикла	L_{loop}	loop и loope
Количество операторов условия	L_{jne}	je, jo, jpe и т. д.
Количество операторов безусловного перехода	L_{jmp}	jmp
Число модулей или подсистем	L_{sub}	subroutine
Отношение числа связей между модулями к числу модулей	$f = N_{sv} / L_{sub}$	

В настоящее время существует большое количество численных показателей, которые используются при оценке программного обеспечения, и при некоторой доработке могут применяться для создания наборов данных.

АЛГОРИТМЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ФОРМАЛИЗОВАННЫХ СВОЙСТВ ДВОИЧНОГО КОДА

В первых методах по анализу двоичного кода, основанных на машинном обучении, использовались базовые методы машинного обучения, такие как логистическая регрессия, линейная регрессия и т. д. С быстрым развитием методов машинного обучения (например, глубоких нейронных сетей) в последнее время используются более продвинутые алгоритмы машинного обучения. В целом все методы машинного обучения, используемые в процессе АДК, можно разделить на три основных класса:

1. Методы на основе контролируемого обучения.
2. Методы на основе неконтролируемого обучения.
3. Методы на основе глубокого обучения.

Методы на основе контролируемого обучения

Существует множество работ в области АДК, в которых используются методы на основе контролируемого обучения. Основные из них приведены в табл. 3.

Таблица 3

Перечень работ в области АДК на основе контролируемого машинного обучения

Наименование метода	Автор	Цель
Машина опорных векторов	<i>Liangboonprakong</i> и др. [12]	Классификация строковых токенов
	<i>Shijo</i> и др. [13]	Классификация ПО, в том числе и вредоносного
	<i>Hosfelt</i> и др. [14]	Классификация криптографических алгоритмов
<i>K</i> -ближайшие соседи	DiscovRE [6]	Определение схожих участков кода
Байесовский классификатор	<i>Hosfelt</i> и др. [14]	Классификация криптографических алгоритмов
	<i>Schultz</i> и др. [15]	Выявление вредоносного кода
Дерево решений	<i>Hosfelt</i> и др. [14]	Классификация криптографических алгоритмов
	<i>Liangboonprakong</i> и др. [12]	Классификация строковых токенов
Случайный лес	<i>Caliskan</i> и др. [16]	Деанонимизация кода
	<i>Shijo</i> и др. [13]	Классификация ПО, в том числе и вредоносного
Ускорение	FID [17]	Распознавание функций в двоичном коде

Машина опорных векторов (МОВ, SVM – support vector machine). В работе [12] используют полиномиальные ядра МОВ для классификации строковых токенов шестнадцатеричных чисел, извлеченных из дизассемблированных файлов.

Программное обеспечение WEKA [13] применяется для обнаружения и распознавания функций в двоичном коде программы, а также последовательностей вызовов API-функций для классификации ПО. В этой работе в качестве методов обучения используются МОВ и «случайный лес», при этом результаты, полученные методом МОВ, гораздо более точны.

В работе [14] сравниваются результаты обучения модели с помощью четырех различных функций: линейной, радиально-базисной, полиномиальной и сигмовидной. В итоге исследования было установлено, что для классификации криптографических алгоритмов в двоичных программах лучше подходит линейная функция ядра.

***K*-ближайшие соседи (K-nearest neighbors).** DiscovRE [6] использует метод *k*-ближайших соседей на основе *k*-мерных деревьев. *K*-мерное дерево представляет собой двоичное дерево поиска, узел которого – *k*-мерный вектор. Одно измерение каждого узла выбирается случайным образом из набора данных. При поиске точки в дереве система начинает работать с корня дерева и спускается вниз. На каждом шаге будет выбран узел наиболее похожий на искомый, что позволяет определять схожие участки двоичного кода.

Байесовский классификатор. Математический аппарат этого классификатора является основным для построения систем принятия решений на основе вероятностей. Основная идея заключается в классификации на основе вероятности принадлежности какого-либо признака к определенному классу.

Модель Байеса является базовым методом обучения для принятия решений с помощью вероятностей. Он классифицирует группы, вычисляя вероятность принадлежности определенного признака к определенному классу.

Если существует признаковое пространство $\{x_1, \dots, x_n\}$ программы X , то вероятность принадлежности программы X к классу C_k для каждого из k возможных исходов будет следующей:

$$P(C_k | X) = \frac{\prod_{i=1}^n P(x_i | C_k) * P(C_k)}{\prod_{j=1}^n P(x_j)}, \quad (12)$$

а функция классификации –

$$\hat{y} = \arg \max_{k \in \{1, \dots, K\}} (P(C_k) \prod_{i=1}^n P(x_i | C_k)). \quad (13)$$

В работе [15] вместе с наивным байесовским классификатором используется полиномиальный наивный байесовский классификатор для обнаружения вредоносных программ. В данном случае вероятность составит

$$P_{NB}(C | X) = \prod_{i=1}^{|NB|} \frac{P_{NB_i}(C | X)}{P_{NB_i}(C)}, \quad (14)$$

где NB – множество наивных байесовских классификаторов;
 $|NB|$ – мощность множества;
 $NB_{i \in \{1, 2, \dots, |NB|\}}$ – конкретный наивный байесовский классификатор,

а функция классификации –

$$\hat{y} = \max_C (P_{NB}(C) * L_{NB}(C | X)), \quad (15)$$

Дерево решений. Данная модель представляет собой иерархическую структуру в виде графа с одним корнем (дерево) в котором узлы – это сформированные решения, дуги – это последствия этих решений, а листья – это результаты решений. Эти три части могут легко отражать атрибуты свойств, значения свойств и категории этих свойств.

Такая древовидная модель обучения используется в работе [14] при анализе двоичного кода для поиска участков, реализующих криптографические алгоритмы. С. Liangboonprakong и О. Sornil [12] в своих исследованиях применяют дерево решений для классификации вредоносных программ. И в первой, и во второй работе делается вывод о том, что точность классификации на основе дерева решений гораздо ниже, чем у МОВ.

Случайный лес (random forest). Это дальнейшее развитие предыдущего метода, поэтому этот подход обладает лучшей производительностью. Он используется в работах [13, 16].

Методы на основе неконтролируемого обучения

В отличие от предыдущей группы методов, эти методы не имеют предварительных знаний о предметной области до процесса обучения. Основные из них приведены в табл. 4.

Таблица 4

Перечень работ в области АДК на основе неконтролируемого машинного обучения

Наименование метода		Автор	Цель
Кластеризация	Кластеризация K -средних	<i>Hosfelt</i> и др. [14] <i>Rosenblum</i> и др. [18]	Идентификация инструкций Установление авторства
	Кластеризация распространения сходства	<i>Clone-hunter</i> [19]	Выявление одинаковых участков кода
	Иерархическая кластеризация	<i>Rieck</i> и др. [20]	Классификация по поведению программ
Обучение на основе правил		<i>Schultz</i> и др. [15]	Выявление свойств вредоносных исполняемых файлов
Взвешенное дерево префиксов		<i>Byteweight</i> [21]	Выявление точек входа функций в двоичном коде

Кластеризация K -средних (K -means clustering). Это кластеризация на основе прототипа (шаблона), которая была впервые представлена Стюартом Ллойдом в 1982 году. Например, в исследованиях [14] используется данный вид кластеризации для идентификации свойств специальных инструкций программы, таких как количество выполнений данной инструкции, тип инструкции (NOP, SYSCALL), а также количество выполняемых циклов реализации шагов в криптографическом алгоритме. Это необходимо для повышения результативности обнаружения криптовирусов во вредоносных программах.

В работе [18] для установления (классификации) авторства исполняемого кода применяется тот же вид кластеризации.

В качестве меры близости выбрана мера удаленности от ближайших соседей (LMNN – *Large Margin Nearest Neighbors*).

В качестве недостатков этого вида кластеризации выделяют предварительное знание количества кластеров, а также плохую работу на неглобулярных кластерах.

Кластеризация распространения сходства (*affinity propagation clustering*). В отличие от предыдущего вида кластеризации этот вид позволяет определять количество кластеров без предварительных знаний (прототипа). Здесь используются три матрицы:

- матрица подобия S ;
- матрица ответственности $R(i, k)$;
- матрица доступности $A(i, k)$.

Если существуют две различные точки данных X_i и X_j , то матрица S рассчитывается как отрицательное значение квадрата евклидова расстояния.

Программа Clone-hunter [19] использует кластеризацию распространения сходства для обнаружения одинаковых участков кода в двоичных файлах следующим образом:

- 1) нормализует двоичный код в промежуточное представление путем удаления некоторых данных из инструкций, таких как имена регистров, адреса памяти и т. д.;
- 2) генерирует наборы данных из нормализованной последовательности инструкций;
- 3) применяет полученные наборы для обучения с помощью алгоритмов распространения сходства для поиска клонов.

Иерархическая кластеризация (*weighted prefix tree*). Это кластеризация наборов данных из разных иерархий, следовательно, она может обрабатывать неглобулярные кластеры. В анализе двоичного кода на основе машинного обучения Rieck [20] предлагает структуру, использующую иерархическую кластеризацию для задачи классификации поведения программ.

Обучение на основе правил (*rule-based*). В работе [15] используют специальную систему обучения на основе правил, которая является предопределенным расширением индуктивного алгоритма формирования правил. Например, этот алгоритм используется для изучения свойств вредоносных исполняемых файлов (в частности, информация из заголовков PE-файлов) для построения модели обнаружения.

Взвешенное дерево префиксов (*weighted prefix tree*). Подобно абстрактному синтаксическому дереву, префиксное дерево представляет собой структуру данных, в которой каждый некорневой узел связан с байтами или инструкциями двоичного кода для того, чтобы обеспечить эффективный поиск информации. При наличии статического пути выполнения, содержащего N инструкций, он может быть представлен в префиксном виде от корня к дочернему узлу.

Программа *Byteweight* [21] использует взвешенное дерево префиксов для распознавания вызова функций в программах. Модель обучения, заложенная в основу этой программы, осуществляет обучение с помощью сигнатур, представленных в виде префиксного дерева. Это дает возможность программе распознавать вызовы функций путем простого сопоставления двоичных фрагментов кода.

Методы на основе глубокого обучения

В настоящее время все чаще применяются методы глубокого машинного обучения к задачам АДК, так как они показывают гораздо лучшие результаты, чем рассмотренные выше. В табл. 5 приведены основные работы в данной области.

Таблица 5

Перечень работ в области АДК на основе глубокого машинного обучения

Наименование метода	Автор	Цель
Рекуррентная нейронная сеть (RNN – <i>Recurrent neural network</i>)	<i>Clone-Slicer</i> [22] <i>Shin</i> и др. [10]	Определение одинаковых участков кода Распознавание функций в двоичной программе
Глубокая нейронная сеть (DNN – <i>Deep Neural Network</i>)	<i>Xu</i> и др. [7]	Преобразование графов
Многослойный перцептрон (MLP – <i>Multiple Layer Perceptron</i>)	<i>Liangboonprakong</i> и др. [12]	Классификация семейств вредоносных программ
Однослойный перцептрон	<i>Gavrilit</i> и др. [23]	Выявление уязвимостей

Рекуррентная нейронная сеть (RNN – recurrent neural network). Рекуррентные нейронные сети показывают хорошие результаты по обработке больших объемов непрерывной текстовой информации, например, двоичный ассемблерный код.

Программа *Clone-slicer* [22] предлагает фреймворк обнаружения клонов кода на основе RNN. Сначала программа преобразует инструкции в токены, а затем использует их в качестве входных данных для RNN. Таким образом, создаются наборы данных на лексическом уровне. После этого используется рекурсивный автоматический кодировщик для объединения наборов и создания отпечатков кода на синтаксическом уровне. Похожим образом используется RNN и в работе [10].

Глубокая нейронная сеть (DNN – Deep Neural Network). DNN представляет собой сложную нелинейную нейронную сеть с несколькими скрытыми слоями. *Xu* [10] осуществляет преобразование графов с помощью DNN до вида ГПУ с атрибутами. Это позволяет в дальнейшем сравнивать две программы, собранные под разные архитектуры, на предмет сходства.

Многослойный перцептрон (MLP – Multiple Layer Perceptron). Многослойный перцептрон – это искусственная нейронная сеть с прямой связью, которая состоит из полностью связанных нейронов, организованных, по крайней мере, в три слоя (входной и выходной слой с одним или несколькими скрытыми слоями). В отличие от обычных нейронных сетей каждый узел использует нелинейную функцию активации (например, сигмовидную функцию), за исключением входных узлов. Таким образом, он может обрабатывать нелинейные данные благодаря своей многослойной и нелинейной активации.

Liangboonprakong [12] использует функции на основе N -граммов для классификации семейств вредоносных программ. Многослойный перцептрон используется в этой работе как одна из классификационных моделей, при этом такая модель не показывает лучшие результаты по точности классификации.

Однослойный перцептрон. Однослойный перцептрон является расширенной версией элементарного перцептрона. Ключевой особенностью такого перцептрона является то, что каждый S -элемент (сенсор, рецептор) однозначно соответствует одному A -элементу (ассоциация), все $S \rightarrow A$ связи имеют вес равный +1, а порог элементов равен 1.

Таким образом, однослойный перцептрон обучается сначала на наборе данных, отражающих специфические свойства двоичного кода (например, вредоносность), а потом наборы данных смешиваются. С одной стороны, данные будут иметь специфические свойства, с другой – данные имеют смешанные свойства. *Gavrilit* [23] предлагает односторонние перцептроны для обнаружения уязвимостей в двоичных файлах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель анализа двоичного кода программ на основе методов машинного обучения, позволяющая осуществлять обоснованный выбор математического аппарата и алгоритмов машинного обучения для анализа двоичного кода при решении задач в области системного моделирования.

Адекватность данной модели доказана с помощью приведенных примеров и исследований, направленных на решение следующих задач:

- классификации ПО;
- классификации криптографических алгоритмов;
- выявления вредоносного кода;
- определения одинаковых участков кода;
- деанонимизации двоичного кода;
- установления авторства программы;
- распознавания функций в двоичном коде и т. д.

Таким образом, предложенная модель АДК на основе машинного обучения может использоваться в широком спектре решаемых задач для обеспечения информационной безопасности в автоматизированных системах.

Список используемых источников

1. Бирюков Д. Н., Лебедев С. Л., Руссу В. Ю. Выбор способа представления функций исполняемого кода программ для формирования обучающей выборки // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2024. – Вып. 690. – С. 102–112.
2. Tesauro G. J., Kephart J. O., Sorkin G. B. Neural networks for computer virus recognition // IEEE expert. – 1996. – № 11(4). – P. 5–6.
3. Cross-architecture bug search in binary executables / J. Pewny [et al.] // IEEE Symposium on Security and Privacy. – 2015. – P. 709–724.
4. Deep learning code fragments for code clone detection / M. White [et al.] // International Conference on Automated Software Engineering. – ACM, 2016. – P. 87–98.
5. Scalable graph-based bug search for firmware images / Q. Feng [et al.] // Conference on Computer and Communications Security. – ACM, 2016. – P. 480–491.
6. Eschweiler S., Yakdan K., Gerhards-Padilla E. DiscovRE: Efficient cross-architecture identification of bugs in binary code // NDSS. – 2016. – Vol. 52. – P. 58–79.
7. Neural network-based graph embedding for cross-platform binary code similarity detection / X. Xu [et al.] // Conference on Computer and Communications Security. – ACM, 2017. – P. 363–376.
8. Flexitaint: A programmable accelerator for dynamic taint propagation / G. Venkataramani [et al.] // 14th International Symposium on High Performance Computer Architecture. – 2008. – P. 173–184.
9. Katz D. S., Ruchti J., Schulte E. Using recurrent neural networks for decompilation // Evolution and Reengineering (SANER) : 25th International Conference on Software Analysis. – 2018. – P. 346–356.
10. Shin E. C. R., Song D., Moazzezi R. Recognizing functions in binaries with neural networks // USENIX Security Symposium. – 2015. – P. 611–626.
11. Automatic analysis of malware behavior using machine learning / K. Rieck [et al.] // Journal of Computer Security. – 2011. – № 19(4). – P. 639–668.
12. Liangboonprakong C., Sornil O. Classification of malware families based on n-grams sequential pattern features // Industrial Electronics and Applications (ICIEA) : 8th IEEE Conference. – 2013. – P. 777–782.

13. *Shijo P.V., Salim A.* Integrated static and dynamic analysis for malware detection // *Procedia Computer Science*. – 2015. – № 46. – P. 804–811.
14. *Hosfelt D. D.* Automated detection and classification of cryptographic algorithms in binary programs through machine learning. – URL : <https://arxiv.org/abs/1503.01186> (дата обращения: 10.10.2024).
15. Data mining methods for detection of new malicious executables / M. G. Schultz [et al.] // *Security and Privacy : IEEE Symposium*. – 2001. – P. 38–49.
16. When coding style survives compilation: De-anonymizing programmers from executable binaries / A. Caliskan-Islam [et al.]. – URL : <https://arxiv.org/abs/1512.08546> (дата обращения: 10.10.2024).
17. *Wang S., Wang P., Wu D.* Semantics-aware machine learning for function recognition in binary code // *Software Maintenance and Evolution (ICSME) : IEEE International Conference*. – 2017. – P. 388–398.
18. *Rosenblum N., Zhu X., Miller B. P.* Who wrote this code? Identifying the authors of program binaries // *European Symposium on Research in Computer Security*. – Springer, 2011. – P. 172–189.
19. *Xue H., Venkataramani G., Lan T.* Clone-hunter: accelerated bound checks elimination via binary code clone detection // *Proceedings of the 2nd ACM SIGPLAN International Workshop on Machine Learning and Programming Languages*. – ACM, 2018. – P. 11–19.
20. Automatic analysis of malware behavior using machine learning / Konrad Rieck [et al.] // *Journal of Computer Security*. – 2011. – № 19(4). – P. 639–668.
21. Byteweight: Learning to recognize functions in binary code / B. Tiffany [et al.] // *USENIX Security Symposium*. – 2014. – P. 124–129.
22. *Xue H., Venkataramani G., Lan T.* Clone-slicer: Detecting domain specific binary code clones through program slicing // *Workshop on Forming an Ecosystem Around Software Transformation (FEAST)*. – 2018. – P. 3–5.
23. Malware detection using machine learning / D. Gavrilut [et al.] // *Computer Science and Information Technology : International Multiconference*. – 2009. – P. 735–741.

В. С. Бахолдин,
доктор технических наук, доцент;
В. А. Добриков,
кандидат технических наук, доцент

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС НА ОСНОВЕ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ

Предлагается способ коррекции ионосферной погрешности псевдодальномерных измерений в реальном масштабе времени в навигационной аппаратуре потребителя. Представлены аналитические соотношения для реализации расширенного фильтра Калмана с использованием вектора состояния потребителя, включающего дополнительные компоненты вертикального полного электронного содержания (ПЭС) и его градиенты по широте и долготе. Приведены результаты экспериментальной апробации рассмотренного способа.

Ключевые слова: измерения псевдодальностей, ионосферные погрешности, полное электронное содержание, навигационная задача.

ВВЕДЕНИЕ

Основными способами компенсации ионосферных погрешностей в измерениях псевдодальностей в аппаратуре потребителей глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) являются двухчастотный и модельный способы.

Двухчастотный способ предполагает проведение измерений на двух несущих частотах и формирование ионосферно-свободных комбинаций. Такой способ устраняет до 90% ионосферной погрешности, однако он требует наличия дорогостоящей и не всем доступной двухчастотной навигационной аппаратуры.

Модельный способ реализуется в нескольких вариантах. Первый вариант модельной коррекции основан на использовании модели с параметрами в виде ионосферной сетки, передаваемой в составе навигационного сообщения со спутников широкозонных дифференциальных подсистем (СДКМ, EGNOS и др.). Такой способ коррекции устраняет до 80% ионосферной погрешности, однако он доступен лишь ограниченному числу потребителей ГНСС. Второй вариант предполагает прием открытого С/А сигнала ГНСС GPS, выделение из навигационного сообщения коэффициентов ионосферной модели Клобучара и расчет ионосферных погрешностей в соответствии с этой моделью [1]. На практике этот вариант коррекции доступен большинству потребителей, однако он позволяет компенсировать лишь до 50% ионосферной погрешности, а иногда и ухудшает точность навигационно-временных определений [2]. Это часто наблюдается на территории Российской Федерации, которая не покрыта сетью станций ионосферного мониторинга ГНСС GPS. Известно так же, что модель Клобучара имеет методическую погрешность косинусной аппроксимации величины ионосферной задержки, не учитывает возмущения в ионосфере, прежде всего солнечные вспышки [3]. Поэтому данный вариант применяется только в том случае, когда другие варианты коррекции недоступны.

СПОСОБ КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСШИРЕННОГО ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ

В данной статье предлагается модельный вариант коррекции в реальном масштабе времени ионосферной погрешности с оценкой по измерениям псевдодальностей вертикального

ПЭС в точке расположения аппаратуры потребителя – основного параметра, определяющего величину ионосферной погрешности. Реализация предлагаемого способа предполагает включение в вектор состояния потребителя ряда дополнительных компонент – вертикального ПЭС и его градиентов по широте и долготе, их оценку по измерениям и пересчет в ионосферные погрешности с последующей коррекцией в текущих измерениях псевдодальностей наблюдаемых навигационных спутников.

Представим уравнения измерений кодовых псевдодальностей после коррекции всех погрешностей (кроме ионосферных) в виде

$$R_j(k) = \rho_j(k) + c\delta t(k) + \frac{40.3M(\beta_j)}{f_j^2} I_j(k) + n_j(k) = h_j(k) + n_j(k), \quad (1)$$

- где j – номер спутника;
 $\rho_j(k)$ – геометрическая дальность между потребителем и навигационным спутником;
 c – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме;
 $\delta t(k)$ – смещение шкалы времени потребителя относительно системной шкалы времени;
 f_j – несущая частота сигнала, излучаемого с борта;
 $I_j(k)$ – вертикальное ПЭС в подионосферной точке j -го спутника,

$$I_j(k) = VTEC_j(\varphi_j, \lambda_j, k);$$
 $M(\beta_j)$ – функция отображения вертикальной ионосферной задержки на произвольный угол возвышения спутника β_j ;
 $n_j(k)$ – остаточные погрешности измерения;
 $h_j(k)$ – навигационная функция;
 k – номер измерения.

Доступные измерения псевдодальностей и навигационные функции на каждом текущем шаге решения навигационной задачи представим в виде векторов:

$$\vec{Y}(k) = [R_1(k) \ R_2(k) \ \dots \ R_j(k) \ \dots \ R_N(k)]^T,$$

$$\vec{h}(k) = [h_1(k) \ h_2(k) \ \dots \ h_j(k) \ \dots \ h_N(k)]^T, \quad (2)$$

где N – число наблюдаемых спутников на k -м шаге.

Для пространственного описания вертикального ПЭС в локальном регионе расположения потребителя на интервале времени 1–2 часа достаточно аппроксимации полиномом 1-й степени, зависимостью от времени и вращением Земли с учетом малости интервала наблюдений можно пренебречь. Такая аппроксимация основана на том, что значение ПЭС изменяется во времени и пространстве относительно медленно [4]. С учетом допущений представим функцию, аппроксимирующую вертикальное ПЭС в локальном районе расположения потребителя, в следующем виде:

$$I_j(k) = I_0(k) + I_\varphi(k)(\varphi_j - \varphi_0) + I_\lambda(k)(\lambda_j - \lambda_0), \quad (3)$$

- где φ_0, λ_0 – широта и долгота расположения потребителя;
 φ_j, λ_j – широта и долгота подионосферной точки j -го спутника;

$I_0(k)$ – неизвестное вертикальное ПЭС в точке расположения потребителя,

$$I_0(k) = VTEC(\varphi_0, \lambda_0, k);$$

$I_\varphi(k)$ – неизвестные градиенты изменения вертикального ПЭС по широте,

$$I_\varphi(k) = \frac{\partial VTEC(k)}{\partial \varphi};$$

$I_\lambda(k)$ – неизвестные градиенты изменения вертикального ПЭС по долготе,

$$I_\lambda(k) = \frac{\partial VTEC(k)}{\partial \lambda}.$$

Неизвестные значения вертикального ПЭС в точке расположения потребителя и его градиенты по широте и долготе будем оценивать по измерениям ГНСС в ходе решения навигационной задачи. В вектор состояния подвижного потребителя, наряду с параметрами положения, движения и параметрами модели генератора аппаратуры потребителя, включаем указанные выше параметры модели ионосферы. Тогда вектор состояния потребителя представляется в виде

$$\vec{X}(k) = [x(k) \ V_x(k) \ y(k) \ V_y(k) \ z(k) \ V_z(k) \ c\delta t(k) \ \lambda\delta f(k) \ I_0(k) \ I_\varphi(k) \ I_\lambda(k)]^T, \quad (4)$$

где $x(k), y(k), z(k)$ – декартовы координаты потребителя;

$V_x(k), V_y(k), V_z(k)$ – проекции вектора скорости потребителя на оси системы координат;

$c\delta t(k)$ – уход шкалы времени потребителя;

$\lambda\delta f(k)$ – смещение частоты опорного генератора потребителя.

В рассматриваемом случае уравнения измерений псевдодальностей (1) являются нелинейными, поэтому для решения навигационной задачи будем использовать расширенный фильтр Калмана. Алгоритм расширенного фильтра Калмана в векторно-матричной форме определяется следующими выражениями [5, 6].

1. Прогноз оценки вектора состояния

$$\hat{X}^*(k) = \Phi(k, k-1)\hat{X}(k-1), \quad (5)$$

где $\Phi(k, k-1)$ – блочная матрица динамики системы размерности 11×11 ,

$$\Phi(k, k-1) = \begin{bmatrix} \Phi_x & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \Phi_y & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \Phi_z & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \Phi_{\varphi\lambda} & \mathbf{0}_{2 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

$$\Phi_x = \Phi_y = \Phi_z = \Phi_{\varphi\lambda} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix};$$

Δt – шаг дискретизации измерений;

$\mathbf{0}_{2 \times 2}, \mathbf{0}_{2 \times 3}$,

$\mathbf{0}_{3 \times 2}, I_{3 \times 3}$ – нулевые и единичная матрицы.

2. Прогноз матрицы корреляции ошибок фильтрации

$$P^*(k) = \Phi(k, k-1)P(k-1)\Phi^T(k, k-1) + K_w,$$

где K_w – матрица корреляции порождающего шума системы размерности 11×11 [6],

$$K_w = \begin{bmatrix} K_{wp} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 2} & K_{wp} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & K_{wp} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & 0_{2 \times 2} & K_{w\phi\lambda} & 0_{2 \times 3} \\ 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 2} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

$$K_{wp} = \sigma_p^2 \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^3}{3} & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \frac{\Delta t^2}{2} & \Delta t \end{bmatrix}, \quad K_{w\phi\lambda} = \begin{bmatrix} \sigma_\phi^2 \Delta t + \sigma_f^2 \frac{\Delta t^3}{3} & \sigma_f^2 \frac{\Delta t^2}{2} \\ \sigma_f^2 \frac{\Delta t^2}{2} & \sigma_f^2 \Delta t \end{bmatrix};$$

σ_p^2 – дисперсия порождающего шума по координатам;

$\sigma_\phi^2, \sigma_f^2$ – дисперсии фазового и частотного шумов опорного генератора аппаратуры потребителей соответственно.

3. Вычисление коэффициента усиления фильтра

$$K(k) = P^*(k)H^T(k) \left[H(k)P^*(k)H^T(k) + K_y \right]^{-1},$$

где $H(k)$ – матрица размерности $N \times 11$ частных производных от вектора навигационных функций $\vec{h}(k)$ (2) по компонентам вектора состояния потребителя $\vec{X}(k)$ (4), вычисляемая в точке, соответствующей экстраполированному значению вектора состояния $\hat{X}^*(k)$ (5),

$$H^T(k) = \left. \frac{\partial \vec{h}^T(k)}{\partial \vec{X}(k)} \right|_{X(k)=\hat{X}^*(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{R1}}{\partial x} & \frac{\partial h_{R2}}{\partial x} & \dots & \frac{\partial h_{Ri}}{\partial x} & \dots & \frac{\partial h_{RN}}{\partial x} \\ \frac{\partial h_{R1}}{\partial V_x} & \frac{\partial h_{R2}}{\partial V_x} & \dots & \frac{\partial h_{Ri}}{\partial V_x} & \dots & \frac{\partial h_{RN}}{\partial V_x} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial h_{R1}}{\partial I_\lambda} & \frac{\partial h_{R2}}{\partial I_\lambda} & \dots & \frac{\partial h_{Ri}}{\partial I_\lambda} & \dots & \frac{\partial h_{RN}}{\partial I_\lambda} \end{bmatrix} \Bigg|_{X(k)=\hat{X}^*(k)}.$$

Частные производные по декартовым координатам потребителя представляют собой направляющие косинусы линий наблюдений навигационных КА, частные производные по компонентам вектора состояния потребителя, описывающим параметры ионосферы, имеют вид:

$$\frac{\partial R_j}{\partial I_0} = \frac{40.3M(\beta_j)}{f_j^2}, \quad \frac{\partial R_j}{\partial I_\phi} = \frac{40.3M(\beta_j)}{f_j^2}(\varphi_j - \varphi_0), \quad \frac{\partial R_j}{\partial I_\lambda} = \frac{40.3M(\beta_j)}{f_j^2}(\lambda_j - \lambda_0).$$

4. Вычисление оценки вектора состояния потребителя

$$\hat{X}(k) = \hat{X}^*(k) + K(k) \left[\vec{Y}(k) - h \left(\hat{X}^*(k) \right) \right],$$

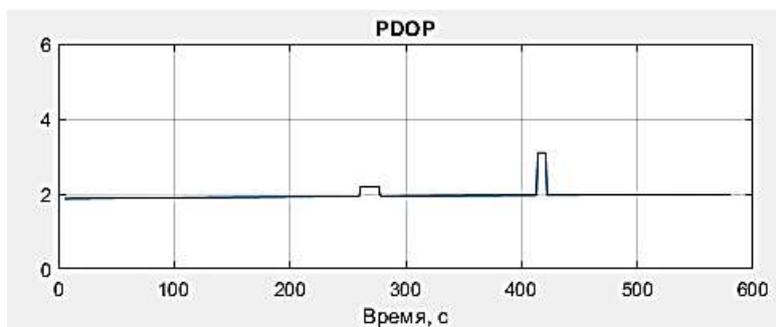
где $h \left(\hat{X}^*(k) \right)$ – прогнозируемое значение вектора измерений, вычисляемое в точке $\hat{X}^*(k)$.

5. Вычисление оценки матрицы корреляции ошибок фильтрации

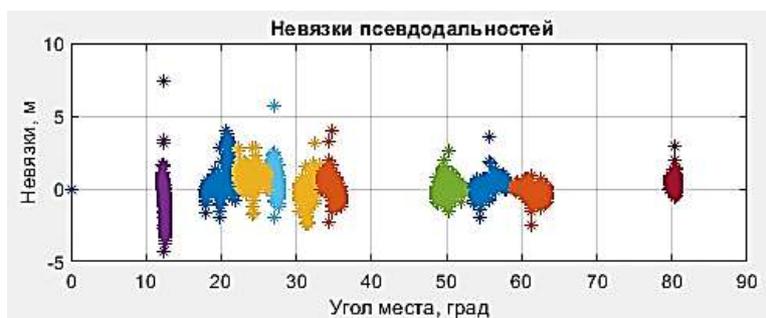
$$P(k) = P^*(k) - K(k)H(k)P^*(k).$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЬНОГО МЕТОДА КОРРЕКЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Для верификации предлагаемого метода оценки параметров ионосферы и коррекции ионосферных погрешностей использовались архивные файлы «сырых» кодовых измерений, выполненных в Северо-Западном регионе Российской Федерации 21.12.2019, и бортовых эфемерид в формате RINEX, а так же файл с апостериорными данными ионосферной сетки ПЭС на указанную дату. В режиме постобработки по архивным RINEX измерениям и бортовым эфемеридам с помощью разработанного в среде *MatLab* программного комплекса была решена навигационная задача с использованием описанного выше алгоритма. Для оценки точности расчета экспериментального вертикального ПЭС было рассчитано «эталонное» апостериорное значение вертикального ПЭС в этой точке с использованием апостериорной ионосферной сетки на время и дату проведения навигационных измерений. На рис. 1 приведены зависимости, характеризующие условия и качество решения навигационной задачи: геометрический фактор PDOP и невязки измерений псевдодальностей.



а)



б)

Рис. 1. Геометрический фактор (а) и невязки измерений псевдодальностей (б)

График на рис. 1,а характеризует геометрические условия наблюдений навигационных КА и соответствует стандартной реализации абсолютного режима навигационных определений по кодовым измерениям. График на рис. 1,б характеризует качество решения навигационной задачи и показывает разброс невязок измерений при достаточно высокой точности решения навигационной задачи по кодовым измерениям.

На рис. 2 представлены принятое за «эталонное», полученное с использованием апостериорной ионосферной сетки вертикальное ПЭС (красным цветом), и оцененное фильтром Калмана в ходе решения навигационной задачи значение вертикального ПЭС (синим цветом) в единицах TECU (по левой оси ординат). На этом же рисунке вдоль правой оси ординат представлены значения вертикальной ионосферной погрешности измерения псевдодальностей в точке расположения аппаратуры потребителя, однозначно определяемые оценками вертикального ПЭС.

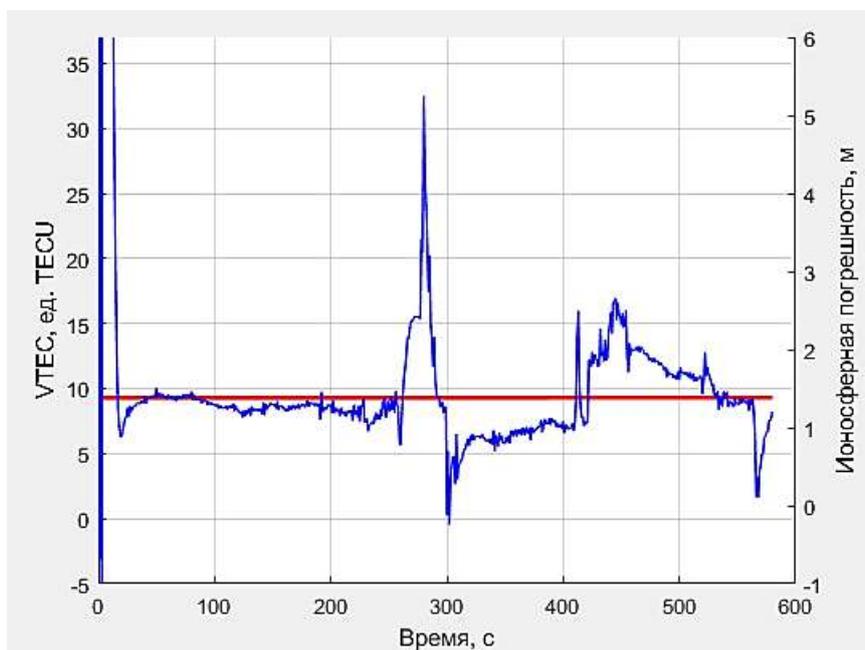


Рис. 2. «Эталонное» и оцененные значения ПЭС и величина ионосферной погрешности

Анализ результатов решения навигационной задачи свидетельствует о сходимости оценки вертикального ПЭС к его апостериорному «эталонному» значению. Время сходимости не превышает 10 с. Аномальные выбросы в полученных оценках объясняются сменой состава навигационных КА, измерения которых используются для решения навигационной задачи. Оценки ионосферной погрешности близки к «эталонным» значениям и пригодны для коррекции кодовых измерений псевдодальностей, на что указывают невязки на рис. 1,б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод коррекции ионосферных погрешностей обеспечивает сходимость оценки вертикального ПЭС в точке расположения потребителя к его апостериорному «эталонному» значению, предоставляемому сервисами ионосферного мониторинга.

Результаты проведенного моделирования показали высокую эффективность коррекции ионосферных погрешностей в измерениях кодовых псевдодальностей на основе оценки вертикального ПЭС в навигационной аппаратуре потребителя.

Рассмотренный метод коррекции ионосферных погрешностей может быть использован в одностотных приемниках системы ГЛОНАСС при невозможности использования информации о состоянии ионосферы от других навигационных систем и сервисов ионосферного мониторинга, а также в двухчастотных навигационных приемниках при низких отношениях сигнал/шум, когда использование ионосферно-свободных комбинаций неэффективно.

Список используемых источников

1. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития / под ред. А. И. Перова. – М. : Радиотехника, 2020. – 1072 с.
2. Результаты совместной программной обработки сигналов глобальных и региональных спутниковых навигационных систем / В. С. Бахолдин [и др.] // Гироскопия и навигация. – 2017. – Т. 25, № 4(99). – С. 84–94.
3. *Альперт Я. Л.* Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – М. : Наука, 1972. – 563 с.
4. Ионосферное обеспечение средств локации, навигации и связи / В. Ф. Иванов [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. – 200 с.
5. *Калман Р. Е., Бьюси Р. С.* Новые результаты в линейной фильтрации и теории предсказания // Техническая механика. – 1961. – Т. 83, сер. Д № 1. – С. 46–53.
6. *Grewal Mohinder S., Angus P. Andrews* Kalman filtering: theory and practice using MATLAB. – USA, 2015. – 617 p.

А. К. Дмитриев
Военный университет, г. Москва.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТКАЗОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЦЕНТРА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, НЕ ТРЕБУЮЩЕЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ АНАЛИЗА ПАКЕТОВ СТАНДАРТНЫХ ПРОТОКОЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости автоматизированных систем военного назначения за счет обеспечения полной наблюдаемости сетевой инфраструктуры центра обработки данных специального назначения. Проведена оценка требуемых ресурсов для определения технического состояния дата-центра среднего масштаба при условии полной наблюдаемости. Предложены методы уменьшения требуемых ресурсов и проведена оценка их результатов. Проанализированы протоколы пакетной передачи данных (IP, FC) и определены общие диагностические показатели. Сделан вывод о необходимости распараллеливания сбора и обработки диагностической информации в сетевой инфраструктуре центров обработки данных.

Ключевые слова: автоматизированные системы военного назначения, центр обработки данных специального назначения, сетевая инфраструктура, надежность, мониторинг, диагностика, полная наблюдаемость, *FibreChannel*, *Internet Protocol*.

ВВЕДЕНИЕ

Информационные технологии с каждым годом оказывают все большее влияние как на экономику, так и на повседневную жизнь людей. Этапы качественного развития большинства отраслей и государственного управления, в том числе в военной сфере, связаны с внедрением информационных технологий [1].

Устойчивое развитие информационных технологий создает предпосылки и выдвигает новые требования для строительства перспективных автоматизированных систем военного назначения (далее – АСВН) и модернизации уже существующих, таких как программное изделие ресурсного обеспечения (ПИРО) «Алушта», автоматизированная система (АС) «Паспорт», автоматизированная система персонального учета (АСПУ) «Жетон-НС», АС «Интеграция-СВО», информационно-справочная правовая система (ИСПС) «Армюрист» и т. д.

Повышение эффективности, устойчивости, надежности и живучести современных и перспективных систем управления войсками (силами) и вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), автоматизированных систем военного назначения, сложных организационно-технических систем военного и двойного назначения обеспечивается прикладными исследованиями и разработками в области информационных технологий, в частности разработкой новых высокопроизводительных систем вычисления и хранения данных, новых технологий связи и протоколов взаимодействия для повышения отказоустойчивости. Результаты перечисленных направлений прикладных исследований в совокупности применяются в строительстве центров обработки данных специального назначения (далее – ЦОД СН).

СЕТЕВАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ КАК ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ работ [2] и [3] показал, что на сегодняшний день в Вооруженных силах Российской Федерации принято на снабжение более 500 автоматизированных систем военного назначения. Очевидно, что гарантированное выполнение задач, в том числе боевых, во мно-

гом зависит от надежности технической основы автоматизированных систем. Автоматизированные системы разрабатываются для решения большого объема типовых расчетных задач, что обуславливает значительное число запросов к серверной части. Нарушения в работе серверной части влекут нарушения в работе клиентов, при этом масштаб последствий зависит от числа функциональных потребителей. Таким образом серверная часть автоматизированной системы является единой точкой отказа для всех функциональных потребителей, что предъявляет к ней особые требования устойчивости.

ЦОД СН – это техническая основа серверной части АСВН. Согласно определению, ЦОД СН является специализированным объектом, представляющим собой связанную систему ИТ-инфраструктуры и инженерной инфраструктуры, оборудование и части которых размещены в здании или помещении, подключенном к внешним сетям, как инженерным, так и телекоммуникационным [4]. ЦОД предназначен для хранения, обработки и распространения информации, его функционал направлен на решение задач предоставления информационных услуг [5].

Рассматриваемая в научной статье сетевая инфраструктура дата-центра входит в состав ИТ-инфраструктуры (рис. 1), обеспечивает взаимодействие серверов и систем хранения данных. Сетевая инфраструктура формируется и наращивается по трехуровневой 3-Tier топологии (доступа, агрегации и ядра) или свернутой *Leaf-Spine* топологии Клоза для построения вертикальных и горизонтальных связей.



Рис. 1. Состав информационно-телекоммуникационной инфраструктуры центра обработки данных

Средний ЦОД вмещает в примерно 500 стоек при оптимальном размещении серверов (в каждой стойке по 16 шт.), вычислительная инфраструктура включает 8000 серверов [6]. Не трудно подсчитать, что для обеспечения сетевого взаимодействия серверов друг с другом и с системой хранения данных (далее – СХД) необходимо около 1000 различных сетевых коммутирующих устройств, 16 000 сетевых адаптеров серверов и СХД, включая 34 000 физических сетевых портов, соединенных 17 000 кабельных соединений общей протяженностью более 500 км, что сопоставимо с масштабом абонентской сети провайдера целого микрорайона, но только на площадке 60x60 м.

Существующие требования в части надежности автоматизированных систем военного назначения предполагают техническую готовность дата-центра специального назначения не ниже 0,99995, которая складывается из технической готовности комплекса программных средств, вычислительной инфраструктуры и сетевой инфраструктуры [4].

ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Надежность оборудования вычислительных сетей и каналов связи, которая лежит в основе сетевой инфраструктуры ЦОД, далека от требуемого значения – согласно нормативной и технической документации установленное значение технической готовности составляет 0,99

[7–9]. Так как на сетевую инфраструктуру ЦОД приходится около 40% отказов и сбоев в работе сетевой инфраструктуры [10], а суммарное время простоя в год при заданной технической готовности 0,99 составляет 3,5 часа, против 10,5 минут в год при требуемой технической готовности 0,99995, то повышение надежности сетевой инфраструктуры ЦОД является актуальной задачей.

Исходя из выражения для показателя надежности [7] – коэффициента технической готовности K_r , существует два пути повышения надежности: увеличение времени наработки до отказа T_o и сокращение времени восстановления после отказа T_b :

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_b}. \quad (1)$$

Время наработки до отказа задается изготовителем сетевого оборудования и повлиять на него в процессе эксплуатации возможно только снижением нагрузки на устройства, что недопустимо в высоконагруженных сетях ЦОД. Кроме того, постоянный рост спроса на вычислительные ресурсы ЦОД, а также отсутствие доступа к рынку высокопроизводительного серверного и сетевого оборудования провоцирует количественное, а не качественное наращивание вычислительной мощности ЦОД, которое в конечном итоге ограничится габаритами здания.

Уменьшение же среднего времени восстановления после сбоя или отказа достигается сокращением времени выявления $T_{вл}$, поиска $T_{п}$ и устранения $T_{у}$ дефекта, для чего используются системы сетевого мониторинга и функциональной диагностики:

$$T_b = T_{вл} + T_{п} + T_{у}. \quad (2)$$

Существующие системы мониторинга и диагностики вычислительных сетей, такие как *Zabbix*, *Tivoli*, *SolarWinds*, *Netscout* и т. д., разрабатывались для обеспечения качества предоставляемых провайдерами услуг (*Quality of Service* – QoS) согласно соглашению об уровне сервиса (SLA). Такие системы контролируют показатели производительности работы вычислительной сети, при этом выявление сбоев осуществляется на основании жалоб пользователей, а поиск неисправностей – эмпирическим или экспертным методом на основании результатов мониторинга. Поддержание технической готовности в локальных вычислительных сетях, предоставляющих пользователям услуги доступа, осуществляется организационными мерами на уровне, заложенном при проектировании сети.

Методы обеспечения надежности сетевой инфраструктуры ЦОД СН направлены на обеспечение уровня доступности сервиса SLA (*service level available*) за счет достижения целевых значений допустимого времени восстановления работоспособности информационной системы RTO (*recovery time objective*) и доступной точкой восстановления состояния информационной системы на момент сбоя RPO (*recovery point objective*).

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЛНОЙ НАБЛЮДАЕМОСТИ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Для повышения уровня технической готовности сетевой инфраструктуры ЦОД СН до требуемого значения ($K_r = 0,99995$) необходимо сокращение среднего времени восстановления, которое складывается из времени выявления, времени поиска и времени устранения дефектов (2). Сокращение времени выявления дефекта достигается увеличением периодичности контроля до частоты следования пакетов данных. Сокращение времени поиска дефекта достигается путем повышения информативности полученных от системы мониторинга данных. Сокращение времени восстановления после отказов достигается их предсказанием на основании статистики сбоев.

Перечисленные пути требуют обеспечения **полной наблюдаемости** вычислительной сети, т. е. измерения значений показателей работы сетевых устройств в каждый момент времени [11]. Сегодня это обеспечивается проприетарным диагностическим обеспечением различных производителей сетевого оборудования, что формирует так называемый «лоскутный мониторинг», т. е. информация предоставляется только по группе устройств определенного производителя. Для гетерогенной мультипротокольной сетевой инфраструктуры ЦОД СН это является негативным фактором в обеспечении полной наблюдаемости технического состояния вычислительной сети ЦОД.

Второй проблемой в обеспечении полной наблюдаемости технического состояния сетевой инфраструктуры ЦОД СН является большой поток диагностической информации. Так как техническое состояние сетевого устройства может измениться при обработке каждого пакета данных, то измерения необходимо проводить для каждого пакета, с частотой, соответствующей битовой скорости физического канала. Рассчитаем объем генерируемых диагностических данных для ранее рассмотренного среднего ЦОД СН, который вмещает следующее оборудование:

- 500 стока-мест;
- 8000 серверов (16 в стойку);
- 500 коммутаторов доступа локальной сети серверов (далее – LAN);
- 32 коммутатора агрегации LAN;
- 2 маршрутизатора ядра LAN;
- 500 коммутаторов доступа сети хранения данных (далее – SAN);
- 2 директора ядра SAN.

Итого: 1064 сетевых устройства.

Каждый сервер укомплектован сетевыми адаптерами для работы в сетях LAN и SAN:

- 8000 сетевых адаптеров *Ethernet*;
- 8000 сетевых адаптеров *FibreCannel*.

Итого: 16 000 сетевых адаптеров.

Суммарно перечисленное активное сетевое оборудование будет иметь 34 000 физических порта пропускной способностью 10 Гбит/с. Исходя из длины кадра *Ethernet* – от 500 до 1500 бит, количество кадров, передаваемых в секунду одним портом составит от

$$10 \text{ [Гбит/с]} / 500 \text{ [бит]} = 20 \cdot 10^6 \text{ кадров в секунду}$$

до

$$10 \text{ [Гбит/с]} / 1500 \text{ [бит]} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ кадров в секунду.}$$

При заданном числе диагностических показателей (ДП) для каждого порта (10 шт.) и размере одного диагностического показателя (8 бит) объем формируемой диагностической информации каждую секунду с одного порта составит от

$$6,6 \cdot 10^6 \text{ [кадр/с]} \cdot 10 \text{ [ДП]} \cdot 8 \text{ [бит]} = 5,2 \cdot 10^8 \text{ бит/с}$$

до

$$20 \cdot 10^6 \text{ [кадр/с]} \cdot 10 \text{ [ДП]} \cdot 8 \text{ [бит]} = 16 \cdot 10^8 \text{ бит/с.}$$

Таким образом, объем формируемой информации на 34 000 портах в зависимости от длины пакетов будет варьироваться от

$$5,2 \cdot 10^8 \text{ [бит/с]} \cdot 34 \text{ 000 [порта]} = 17,68 \cdot 10^{12} = 12,7 \text{ Тбит/с;}$$

до

$$16 \cdot 10^8 \text{ [бит/с]} \cdot 34 \text{ 000 [порта]} = 54,4 \cdot 10^{12} = 54,4 \text{ Тбит/с.}$$

Из вышеизложенного понятно, что существующие системы мониторинга и диагностики разрабатывались для обеспечения более низких требований технической готовности, а заложенные в них принципы не позволяют применить их для обеспечения полной наблюдаемости сетевой инфраструктуры ЦОД СН. Преодоление перечисленных проблем заключается в следующем:

1) для обеспечения полной наблюдаемости сетевой инфраструктуры перейти к потоковой телеметрии от проприетарного диагностического обеспечения;

2) для уменьшения потока диагностической информации уменьшить количество измеряемых показателей путем выбора наиболее информативных по ранее разработанным правилам [12];

3) для сокращения времени обработки полученной диагностической информации диагностические показатели необходимо привести к одному виду для каждого устройства независимо от протокола передачи данных (*Ethernet*, IP, FC) и типа сетевого устройства (коммутатор L2/L3, маршрутизатор).

Основной функцией вычислительной сети является передача данных между участниками сети. Свойства пакета данных в результате передачи между узлами сети претерпевают изменения, которые связаны с параметрами работы сетевых устройств и средой передачи данных, что позволяет осуществить техническое диагностирование.

Интересующие нас показатели описаны стандартными стеками протоколов передачи данных IP и FC, которые используют все сетевые устройства пакетной передачи данных независимо от производителя. В результате анализа перечисленных протоколов были выявлены синонимичные диагностические показатели, представленные в табл. 1 [13].

Таблица 1

Синонимичные диагностические показатели протоколов IP и FC

Диагностические показатели стека протоколов FC	Диагностические показатели стека протоколов IP
R_A_TOV Resource Allocation Timeout Value время нахождения кадра внутри фабрики	IPD (Internet Packet Delay) Задержка передачи IP-пакетов
CRC (Cyclic Redundancy Check)_Frame Count негативные исходы циклической проверки избыточности кадра	IPER (Internet Packet Error) Коэффициент ошибок IP-пакетов CRC errors – для Ethernet
CRC_Seqince Count негативные исходы циклической проверки избыточности последовательности	IPSLBR (Internet Packet Severe Loss Block Ratio) Коэффициент блоков с потерями IP-пакетов
Ошибки кодирования на физическом уровне, описанные стандартом JESD204C	

Результаты анализа протоколов пакетной передачи в части свойств передаваемых данных предлагается свести к двум диагностическим показателям: времени передачи пакета (кадра) между устройствами t_n и вероятности (наличию) битовой ошибки в пакете (кадре) P_{err} [13].

Время передачи кадра t_n взаимно-однозначно связано с таким параметром сетевого устройства как время узловой обработки кадра T_y (время передачи кадра из входного в выходной порт сетевого устройства), которое зависит от технического состояния электронной базы сетевого устройства, ширины шины данных, тактовой частоты процессора, скорости чтения/записи буферной памяти, конструктивно определенной производителем внутренней схемы коммутации портов. Выход из строя или ухудшение характеристик любого из перечисленных компонентов повлечет увеличение времени узловой обработки T_y .

Вероятность битовой ошибки в кадре P_{err} обусловлена воздействием на физическую среду передачи данных внешних стационарных и нестационарных аддитивных помех, а также мультипликативных помех. Степень воздействия помех в целом указывает на помехозащищенность кабельной линии. Кроме того, дальнейший анализ показал, что при условии полной наблюдаемости в зависимости от случайного, периодического или линейного роста числа битовых ошибок возможно определить вид помехи, как следствие – ее источник (внешний стационарный или нестационарный, ухудшение характеристик среды передачи). Результаты анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Связь диагностических показателей с параметрами состояния сетевых устройств
и вероятными причинами изменения значений диагностических показателей**

Диагностические показатели передачи кадра между устройствами	Параметр состояния функционального элемента	Причины
t_n – время передачи кадра между устройствами	Время узловой обработки кадра сетевым устройством	Ненадлежащее техническое состояние электронной базы сетевого устройства
P_{err} – вероятность возникновения битовой ошибки	Устойчивость кабельной линии к внешним помехам	Воздействие внешних стационарных аддитивных помех
T_{err} – периодичность возникновения битовой ошибки	Электромагнитная совместимость (ЭМС) устройств	Воздействие внешних стационарных аддитивных помех
k_{err} – рост числа ошибок	Устойчивость кабельной линии к внутренним помехам	Воздействие внутренних мультипликативных помех

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный эффект от применения предложенных диагностических показателей рассмотрен на ранее приведенном примере. Объем диагностической информации потоковой телеметрии сетевой инфраструктуры среднего ЦОД в режиме передачи данных со скоростью 10 Гбит/с составит от 3,5 до 11 Тбит/с. Что в сравнении с ранее полученными результатами демонстрирует уменьшение объема диагностической информации о техническом состоянии вычислительной инфраструктуры в пять раз (для минимальной длины пакета).

Тем не менее полученные значения не позволяют технически реализовать централизованную систему мониторинга и диагностики. Распараллеливание процессов сбора и обработки такого потока информации позволит обеспечить полную наблюдаемость вычислительной инфраструктуры ЦОД СН с целью своевременного определения отказов функциональных элементов сетевой инфраструктуры ЦОД без привлечения дополнительного диагностического обеспечения за счет анализа пакетов стандартных протоколов передачи данных.

Список используемых источников

1. Стратегия развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года : распоряжение Правительства РФ № 2036-р от 1 ноября 2013 г. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70398122/?ysclid=m3g7fak3j177695605> (дата обращения: 13.11.2024).
2. Экономика и организация промышленного производства : учеб. пособие / А. П. Вавилов [и др.]; под ред. М. Н. Тимохина. – М. : Мысль, 1982. – 336 с.
3. Каргин В. Н., Козичев В. Н. Эволюция автоматизированных информационных систем в Вооруженных силах // Военная мысль. – 2009. – № 7. – С. 29–39.
4. ГОСТ Р 58811-2020 Центры обработки данных. Инженерная инфраструктура. Стадии создания. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200171331> (дата обращения: 19.06.2024).
5. ГОСТ Р 59486-2021 Слаботочные системы. Кабельные системы. Кабельные системы для высокопроизводительных сетей в центрах обработки данных. Основные положения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200179567> (дата обращения: 19.06.2024).

6. Новая система классификации ЦОД по размеру от Data Center Institute – Новости рынка ЦОД, обзор инженерных решений Дата-Центров. – URL: <https://telecomblogger.ru/23443> (дата обращения: 19.06.2024).
7. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200073594> (дата обращения: 19.06.2024).
8. Приказ Мининформсвязи РФ № 113 от 27.09.2007. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=112613> (дата обращения: 19.06.2024).
9. Приказ Минкомсвязи РФ № 104 от 25.08.2009. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=143119> (дата обращения: 19.06.2024).
10. *Schroeder B., Gibson G.* A large-scale study of failures in high-performance computing systems // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. – 2010. – Vol. 7, № 4. – P. 337–350. – DOI: 10.1109/TDSC.2009.4.
11. *Дмитриев А. К., Юсупов Р. М.* Идентификация и техническая диагностика. – М. : МО СССР, 1987. – 521 с.
12. *Дмитриев А. К.* Синтез агрегированной модели вычислительной сети специального назначения в части представления классов технических состояний // Военный академический журнал. – 2023. – № 2(38). – С. 151–160.
13. *Дмитриев А. К.* Методика построения универсальной диагностической модели гетерогенной сетевой инфраструктуры вычислительных центров // Военный академический журнал. – 2023. – № 4(40). – С. 150–160.

В. С. Конищев,
кандидат технических наук;
Г. Н. Мальцев,
доктор технических наук, профессор

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ КОМАНДНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМИ СИГНАЛАМИ С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА В УСЛОВИЯХ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ

Представлен методический подход к анализу помехоустойчивости канала передачи командно-программной информации командно-измерительных систем в условиях совместного действия широкополосных и узкополосных помех. Предполагается, что в приемном устройстве при выделении символов кода передаваемых формализованных сообщений командно-программной информации осуществляется корреляционное различение сигналов. Условия приема характеризуются эквивалентным отношением сигнал/шум, учитывающим отношение сигнал/шум по широкополосной помехе и отношение сигнал/помеха по узкополосной помехе. Представлены результаты расчетов вероятности символьной ошибки в условиях узкополосных помех при различных отношениях сигнал/помеха и значениях параметра узкополосной помехи, зависящего от ее спектральных характеристик.

Ключевые слова: передача формализованных сообщений, сигналы с расширением спектра, узкополосные помехи, корреляционный прием, эквивалентное отношение сигнал/шум.

ВВЕДЕНИЕ

Командно-измерительные системы (КИС) являются средствами радиоуправления космическими аппаратами и представляют собой многофункциональные радиотехнические системы (РТС). В современных и перспективных КИС используются сигналы с расширением спектра с фазовой модуляцией псевдослучайной последовательностью (ПСП) [1, 2]. При анализе помехоустойчивости РТС с сигналами с расширением спектра необходимо учитывать влияние широкополосных и узкополосных помех. Широкополосные помехи описываются моделью белого гауссовского шума, действующего в пределах всей полосы частот сигнала РТС, а узкополосные помехи имеют спектральные составляющие, сосредоточенные в части полосы частот сигнала РТС. Необходимость анализа помехоустойчивости КИС в условиях узкополосных помех обусловлена как широкой полосой частот используемых в КИС сигналов с расширением спектра, так и возможным воздействием на работу КИС помех от других РТС или различных типов преднамеренных помех [3, 4].

Для передачи на космические аппараты управляющих воздействий в виде формализованных сообщений в состав КИС входит канал передачи командно-программной информации (КПИ). При анализе помехоустойчивости канала передачи КПИ он рассматривается как РТС передачи информации. Помехоустойчивость РТС передачи информации хорошо изучена при реализации оптимального корреляционного приема сигналов в условиях помех, описываемых моделью белого гауссовского шума [5, 6]. К таким помехам относятся широкополосные шумовые помехи. Влияние на прием сигнала широкополосной помехи характеризуется отношением сигнал/шум, от которого зависят вероятностные показатели помехоустойчивости, в частности, вероятность символьной ошибки при приеме сообщений. Корреляционный прием широко применяется в РТС независимо от вида действующих помех [3, 4]. При этом для анализа помехоустойчивости РТС передачи информации может быть использовано определение вероятностных показателей помехоустойчивости по величине эквивалентного отношения сигнал/шум, учитывающего отношение сигнал/шум по широкополосной помехе и от-

ношение сигнал/помеха по узкополосной помехе [3, 7]. В настоящей статье рассмотрена методика анализа помехоустойчивости канала передачи КПИ КИС с сигналами с расширением спектра в условиях узкополосных помех с использованием эквивалентного отношения сигнал/шум.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ПРИ ПРИЕМЕ СИГНАЛОВ С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА В УСЛОВИЯХ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ

Для анализа помехоустойчивости РТС передачи информации в условиях узкополосных помех рассмотрим процесс на входе приемного устройства КИС в следующем виде:

$$x(t) = s(t) + n(t) + y(t), \quad (1)$$

где $s(t)$ – сигнал;
 $n(t)$ – широкополосная помеха;
 $y(t)$ – узкополосная помеха.

При передаче сообщений двоичным кодом сигнальная составляющая $s(t)$ в выражении (1) принимает значения $s_1(t)$ или $s_2(t)$, соответствующие символам кода «0» и «1». Полагается, что сигналы $s_1(t)$ и $s_2(t)$ имеют одинаковую энергию

$$E_c = \int_0^{\Delta T} s_1^2(t) dt = \int_0^{\Delta T} s_2^2(t) dt,$$

приходящуюся на длительность символа ΔT . Соотношение между уровнями сигнала и действующих помех характеризуют отношение сигнал/шум $q = E_c/N_0$ (где N_0 – спектральная плотность мощности широкополосной помехи $n(t)$, описываемой моделью белого гауссовского шума) и отношение сигнал/помеха $q_n = P_c/P_n$ (где P_c – мощность сигнала, P_n – мощность узкополосной помехи $y(t)$). Совместное влияние широкополосной и узкополосной помех учитывается эквивалентным отношением сигнал/шум $q_{\text{эв}}$, которое зависит от отношений сигнал/шум q и сигнал/помеха q_n .

При передаче i -го символа двоичного кода используемый в КИС фазоманипулированный сигнал с расширением спектра может иметь вид

$$s_i(t) = \sqrt{2P_c} d(t) p_i(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (2)$$

где $p_i(t)$ – расширяющая функция фазовой манипуляции $[0, \pi]$ сигнала двоичными символами L -элементной ПСП $a_{li} \in \{0, 1\}$, $l=1, 2, \dots, L$, $i=1, 2$,

$$p_i(t) = \sum_{l=1}^L (-1)^{a_{li}} u[t - (l-1)\Delta t];$$

f_0 – частота сигнала;
 φ_0 – начальная фаза сигнала.

Функции $d(t)$ и $u(t)$ представляют собой функции окна, соответствующие длительности периода ΔT и длительности элемента Δt модулирующей ПСП:

$$d(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \Delta T, \\ 0, & t < 0, t > \Delta T, \end{cases}$$

$$u[t - (l-1)\Delta t] = \begin{cases} 1, & (l-1)\Delta t \leq t \leq l\Delta t, \\ 0, & t < (l-1)\Delta t, t > l\Delta t \end{cases}$$

для l -го элемента ПСП. У фазоманипулированного сигнала вида (2) база $B = L$ равна числу элементов в периоде ПСП, а ширина полосы частот $\Delta F_c = 2/\Delta t$ определяется длительностью элемента и, соответственно, тактовой частотой модулирующей ПСП. Длительность символа кода передаваемого сообщения КПИ в общем случае равна или кратна периоду ПСП ΔT [1, 3]. При передаче двоичного символа кода в течение периода ПСП он отображается в последовательности элементов ПСП $a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{Li}$, $i = 1, 2$.

При посимвольном приеме передаваемых сообщений в РТС передачи информации выделение символов кода осуществляется в процессе корреляционного различия сигналов. На рис. 1 приведены структурные схемы устройств корреляционного различия бинарных сигналов с одинаковой энергией. На схемах показаны операции умножения на опорную функцию и интегрирования.

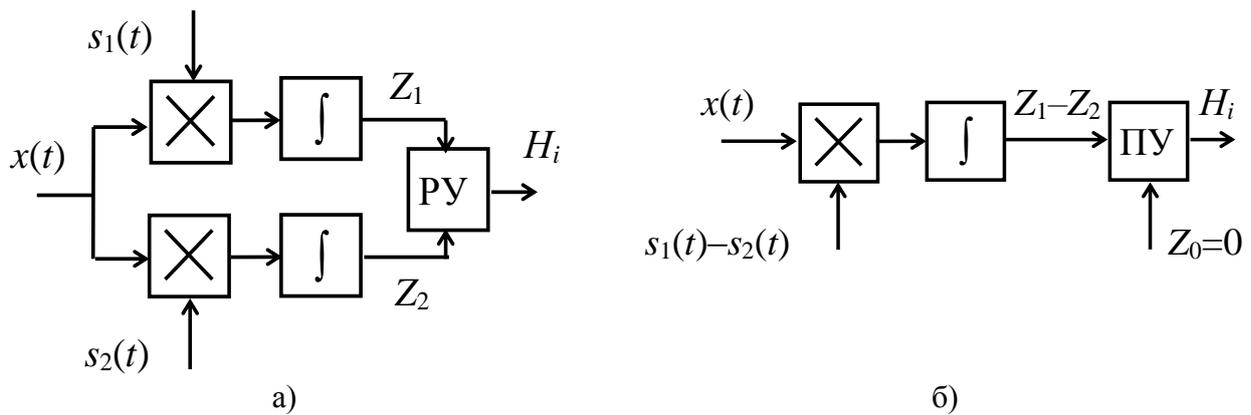


Рис. 1. Структурные схемы двухканального (а) и одноканального (б) устройств корреляционного различия бинарных сигналов

В двухканальном устройстве входной процесс $x(t)$ перемножается с опорными функциями, соответствующими сигналам $s_1(t)$ и $s_2(t)$, и вычисляются корреляционные интегралы $Z_1 = \int_0^{\Delta T} x(t)s_1(t)dt$ и $Z_2 = \int_0^{\Delta T} x(t)s_2(t)dt$. Полученные значения корреляционных интегралов Z_1 и Z_2 сравниваются в решающем устройстве (РУ). По наибольшему из корреляционных интегралов на выходе устройства формируется гипотеза H_i , $i = 1, 2$, о наличии в реализации входного процесса $x(t)$ сигнала $s_1(t)$ или сигнала $s_2(t)$.

В одноканальном устройстве входной процесс $x(t)$ перемножается с опорной функцией, соответствующей разности сигналов $s_1(t) - s_2(t)$, и вычисляется разность корреляционных интегралов $Z_1 - Z_2 = \int_0^{\Delta T} x(t)[s_1(t) - s_2(t)]dt$. Полученное значение разности корреляционных

интегралов $Z_1 - Z_2$ сравнивается в пороговом устройстве (ПУ) с пороговым значением $Z_0 = 0$. По величине разности корреляционных интегралов на выходе устройства формируется гипотеза H_i , $i = 1, 2$, о наличии в реализации входного процесса $x(t)$ сигнала $s_1(t)$ или сигнала $s_2(t)$.

Устройства корреляционного различия сигналов являются оптимальными в условиях белого гауссовского шума [5, 6]. Корреляционное различие сигналов также используется при приеме сигналов в условиях других типов помех, если их структура априорно не известна [3, 4], хотя в данном случае оно уже не является оптимальным. В общем случае при корреляционном различии сигналов с расширением спектра при действии широкополосной и узкополосной помех и отношениях сигнал/шум q и сигнал/помеха q_n эквивалентное отношение сигнал/шум определяется выражением [3]

$$q_{\text{экв}} = \left(\frac{1}{q} + \frac{\eta}{Bq_{\text{п}}} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где B – база сигнала;
 η – параметр узкополосной помехи.

Параметр η зависит от частотных параметров узкополосной помехи $y(t)$, характеризующих ее спектральные характеристики и положение в полосе частот сигнала. Чем больше величина параметра η , тем сильнее влияние узкополосной помехи $y(t)$ на прием сигнала. При $q_{\text{п}} \rightarrow \infty$ выполняется $q_{\text{экв}} = q$, при $q \rightarrow \infty$ выполняется $q_{\text{экв}} = Bq_{\text{п}}/\eta$. Имеет место существенная зависимость величины $q_{\text{экв}}$ от $q_{\text{п}}$ в области малых значений $q_{\text{п}}$ и насыщение $q_{\text{экв}}$ на уровне $q_{\text{экв}} = q$ в области больших значений $q_{\text{п}}$.

В соответствии с выражением (3) величина $q_{\text{экв}}$ практически определяется величинами q и $Bq_{\text{п}}$. При этом в отношении сигнал/шум $q = E_c/N_0$ накопление сигнала при вычислении корреляционного интеграла учитывает энергия сигнала $E_c = P_c \Delta T$. Отношение сигнал/помеха $q_{\text{п}} = P_c/P_{\text{п}}$ определяется для мощности сигнала P_c и его накопление при вычислении корреляционного интеграла учитывает величина $Bq_{\text{п}}$ [8, 9]. В результате величина $Bq_{\text{п}}$, как и величина q , приводится ко входу решающего устройства выделения символов кода. С учетом того, что базы B сигналов, используемых в КИС, составляют сотни и тысячи [1, 2], для получения сопоставимых значений отношений сигнал/шум и сигнал/помеха введем обозначение $q_{\text{п1}} = Bq_{\text{п}}$. Тогда выражение для эквивалентного отношения сигнал/шум (3) преобразуется к виду

$$q_{\text{экв}} = \frac{qq_{\text{п1}}}{\eta q + q_{\text{п1}}}. \quad (4)$$

Для входного процесса (1) параметр η узкополосной помехи $y(t)$ заданного типа определяется на основании анализа математического ожидания $M[Z]$ и дисперсии $D[Z]$ статистики корреляционного интеграла

$$Z = \int_0^{\Delta T} x(t)s(t)dt$$

при приеме сигнала с расширением спектра $s(t)$ вида (2). Если широкополосная $n(t)$ и узкополосная $y(t)$ помехи независимы и имеют нулевые средние значения, то значение корреляционного интеграла имеет математическое ожидание $M[Z] = \sqrt{2P_c} \Delta T$ и дисперсию

$$D[Z] = N_0 \Delta T + \eta P_{\text{п}} \Delta T \Delta t. \quad (5)$$

В выражении (5) первое слагаемое является составляющей дисперсии корреляционного интеграла Z , обусловленной широкополосной помехой $n(t)$, а второе слагаемое является составляющей дисперсии корреляционного интеграла, обусловленной узкополосной помехой $y(t)$, где параметр η характеризует степень ее влияния на прием сигнала.

Таким образом, при совместном действии широкополосных и узкополосных помех при заданных значениях q , $q_{\text{п}}$ и B величина $q_{\text{экв}}$ зависит от параметра η узкополосной помехи, а при $q \gg q_{\text{п}}$ влияние параметра η на величину $q_{\text{экв}}$ может быть определяющим.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В ЧАСТИ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ СИГНАЛА С РАСШИРЕНИЕМ СПЕКТРА

Рассмотрим определение параметра η для трех основных типов узкополосных помех, которые могут действовать при приеме сигналов с расширением спектра – узкополосных шумовых помех и гармонических немодулированных и модулированных по частоте помех. При

фиксированном отношении сигнал/помеха q_n влияние этих помех на прием сигналов зависит от частоты (средней частоты) и ширины спектра помехи. Интересующий параметр помех η определяется этими частотными параметрами.

Гармоническая немодулированная помеха описывается выражением

$$y(t) = \sqrt{2P_n} \cos(2\pi f_n t + \varphi_{0n}), \quad (6)$$

где P_n – мощность помехи;
 f_n – частота помехи;
 φ_{0n} – случайная начальная фаза помехи.

Энергетический спектр гармонической немодулированной помехи представляет собой δ -функцию на частоте $f = f_n$. Гармоническая помеха с частотой f_n действует в полосе частот сигнала ΔF_c при выполнении условия $|f_0 - f_n| < \Delta F_c/2$. Помеха вида (6) представляет собой квазидетерминированный процесс. Ее частотным параметром является частота f_n . Отметим, что данное описание одиночной гармонической помехи может быть распространено на многочастотную гармоническую помеху как совокупность гармонических помех вида (6) с различными частотами f_n .

Узкополосная шумовая помеха представляет собой случайный процесс и описывается спектральной плотностью мощности:

$$N_y(f) = \begin{cases} \frac{P_n}{\Delta F_n}, & f_n - \frac{\Delta F_n}{2} \leq f \leq f_n + \frac{\Delta F_n}{2}, \\ 0, & f < f_n - \frac{\Delta F_n}{2}, f > f_n + \frac{\Delta F_n}{2}, \end{cases} \quad (7)$$

где P_n – мощность помехи;
 f_n – средняя частота спектра помехи;
 ΔF_n – ширина полосы частот помехи.

Реализации узкополосной шумовой помехи, как случайного процесса, могут быть представлены в виде

$$y(t) = \sqrt{2P_n} [g_C(t) \cos 2\pi f_n t + g_S(t) \sin 2\pi f_n t], \quad (8)$$

где $g_C(t)$, $g_S(t)$ – некоррелированные случайные процессы с нулевым средним значением и шириной полосы частот ΔF_n . Частотными параметрами помехи вида (8) являются ее средняя частота f_n и ширина полосы частот ΔF_n . Вся полоса частот узкополосной шумовой помехи ΔF_n попадает в полосу частот сигнала ΔF_c при выполнении условия $\Delta F_n + 2|f_0 - f_n| < \Delta F_c$.

Гармоническая модулированная по частоте помеха описывается выражением

$$y(t) = \sqrt{2P_n} \cos \{ [2\pi(f_n - \Delta f_n) + 4\pi \Delta f_n k_n(t)] t + \varphi_{0n} \}, \quad (9)$$

где P_n – мощность помехи;
 f_n – центральная частота помехи;
 $2\Delta f_n$ – ширина диапазона частот, в котором осуществляется перестройка частоты помехи в соответствии с функцией $k_n(t)$;
 φ_{0n} – случайная начальная фаза помехи.

Помеха вида (9) представляет собой квазидетерминированный процесс. Если функция перестройки частоты помехи $k_n(t)$ на интервале времени ΔT является линейной и выполняется условие $2\Delta f_n \Delta T \gg 1$, то энергетический спектр гармонической модулированной по частоте помехи вида (9) практически совпадает по форме со спектральной плотностью мощности узкополосной шумовой помехи (7) при $\Delta F_n = 2\Delta f_n$. Частотными параметрами помехи вида (9)

являются ее центральная частота f_n и ширина полосы частот $2\Delta f_n$. Вся полоса частот гармонической помехи с линейным изменением частоты $2\Delta f_n$ попадает в полосу частот сигнала ΔF_c при выполнении условия $2\Delta f_n + 2|f_0 - f_n| < \Delta F_c$.

Для рассматриваемых типов узкополосных помех при приеме фазоманипулированного сигнала с расширением спектра вида (2) и вычислении корреляционного интеграла Z параметр η принимает значения $0 < \eta \leq 1$, и наибольшему влиянию узкополосной помехи $y(t)$ на качество приема сигналов соответствует значение ее параметра $\eta = 1$.

Для гармонической немодулированной помехи с частотой в полосе частот сигнала параметр η определяется выражением

$$\eta = \frac{\sin^2[\pi(f_0 - f_n)\Delta t]}{[\pi(f_0 - f_n)\Delta t]^2}. \quad (10)$$

Введем параметр $\mu = |f_0 - f_n| / \Delta F_c$, характеризующий отклонение частоты гармонической помехи f_n от несущей частоты сигнала f_0 . Величина нормированного параметра μ изменяется в диапазоне $0 \leq \mu < 0,5$. Тогда выражение (10) может быть преобразовано к виду

$$\eta = \frac{\sin^2(2\pi\mu)}{(2\pi\mu)^2}. \quad (11)$$

При изменении нормированной отстройки помехи μ в диапазоне $0 \leq \mu < 0,5$ параметр помехи η , определяемый выражением (11), изменяется в диапазоне $0 < \eta \leq 1$. Максимальное значение $\eta = 1$ имеет место при $\mu = 0$ ($f_n = f_0$) – совпадении частоты помехи с несущей частотой сигнала. Минимальное значение $\eta = 0$ имеет место при $\mu = 0,5$ ($f_n = f_0 + \Delta F_c/2$) – гармонической помехе, действующей на границе полосы частот сигнала.

Для узкополосной шумовой помехи и гармонической модулированной по частоте помехи с линейным изменением частоты, действующих в полосе частот сигнала, параметр η определяется выражением

$$\eta = \frac{1}{\Delta F_n} \int_{f_n - \Delta F_n/2}^{f_n + \Delta F_n/2} \frac{\sin^2[\pi(f_0 - f)\Delta t]}{[\pi(f_0 - f)\Delta t]^2} df. \quad (12)$$

Введем параметр $\lambda = \Delta F_n / \Delta F_c$, представляющий собой отношение ширины полосы частот помехи $\Delta F_n = 2\Delta f_n$ и ширины полосы сигнала ΔF_c . Величина нормированного параметра λ изменяется в диапазоне $0 < \lambda < 1$. Также используем введенный параметр $\mu = |f_0 - f_n| / \Delta F_c$, в данном случае характеризующий отклонение средней частоты помехи f_n от несущей частоты сигнала f_0 . Величина нормированного параметра μ изменяется в диапазоне $0 \leq \mu \leq 0,5$. При этом для значений параметров μ и λ имеет место ограничение $\lambda \leq (1 - 2\mu)$, соответствующее условию $\Delta F_n + 2|f_0 - f_n| < \Delta F_c$. Тогда выражение (12) может быть преобразовано к виду

$$\eta = \frac{1}{\lambda} \int_{-\lambda/2}^{\lambda/2} \frac{\sin^2[2\pi(\mu - \nu)]}{[2\pi(\mu - \nu)]^2} d\nu. \quad (13)$$

При изменении нормированной отстройки помехи μ в диапазоне $0 \leq \mu < 0,5$ и нормированной ширины спектра помехи в диапазоне $0 < \lambda < 1$ параметр помехи η , определяемый выражением (9), изменяется в диапазоне $0 < \eta \leq 1$. В пределе при $\lambda \rightarrow 0$, что соответствует гармонической помехе как предельному случаю узкополосной помехи, зависимость η от μ , определяемая выражением (13), переходит в зависимость η от μ , определяемую выражением (11). Максимальное значение $\eta = 1$ имеет место при $\mu = 0$ и $\lambda \rightarrow 0$ ($f_n = f_0$ и $\Delta F_n \rightarrow 0$) – совпаде-

нии средней частоты помехи и несущей частоты сигнала или гармонической помехе. Минимальное значение $\eta = 0$ имеет место при $\mu = 0,5$ и $\lambda \rightarrow 0$ ($f_{\text{п}} = f_0 + \Delta F_{\text{с}}/2$ и $\Delta F_{\text{п}} \rightarrow 0$) – гармонической помехе, действующей на границе полосы частот сигнала.

Анализ выражений (10) и (12) для параметра η рассмотренных типов узкополосных помех показывает, что максимальное значение $\eta = 1$ имеет место в случае гармонической помехи с частотой $f_{\text{п}} = f_0$, совпадающей с несущей частотой сигнала. Это также является предельным случаем влияния на прием сигналов узкополосных помех с шириной полосы частот $\Delta F_{\text{п}}$ при $\Delta F_{\text{п}} \rightarrow 0$ и согласуется с известным положением об эффективности постановки немодулированных гармонических помех на несущей частоте сигнала с расширением спектра при неизвестной постановщику помех структуры модулирующей функции сигнала [10].

Нормированная ширина спектра помехи λ и нормированная отстройка частоты гармонической помехи или средней частоты узкополосной помехи от частоты сигнала μ являются нормированными частотными параметрами рассматриваемых типов узкополосных помех. На рис. 2 приведены результаты расчетов параметра η узкополосной помехи от в зависимости от ее нормированных частотных параметров λ и μ .

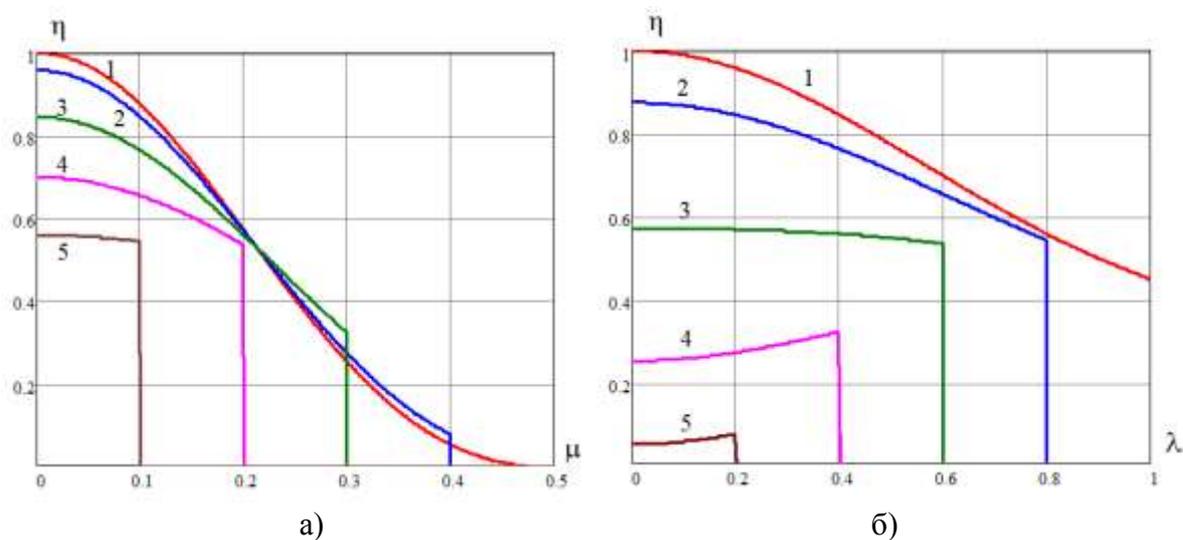


Рис. 2. Зависимости параметра узкополосной помехи от ее нормированной отстройки (а) и нормированной ширины спектра (б)

На рис. 2,а приведены зависимости параметра η от нормированной отстройки помехи μ при фиксированных значениях нормированной ширины спектра помехи λ . Кривая 1 соответствует $\lambda = 0$ и зависимости (11) параметра η от нормированной отстройки μ для гармонической помехи, кривая 2 – $\lambda = 0,2$, кривая 3 – $\lambda = 0,4$, кривая 4 – $\lambda = 0,6$, кривая 5 – $\lambda = 0,8$.

На рис. 2,б приведены зависимости параметра η от нормированной ширины спектра λ при фиксированных значениях нормированной отстройки μ . Кривая 1 соответствует $\mu = 0$, кривая 2 – $\mu = 0,1$, кривая 3 – $\mu = 0,2$, кривая 4 – $\mu = 0,3$, кривая 5 – $\mu = 0,4$. С учетом ограничения $\lambda \leq (1 - 2\mu)$ ненулевые значения параметра η показаны для тех значений параметров μ и λ , для которых выполняется это ограничение.

Таким образом, методика анализа помехоустойчивости КИС с сигналами с расширением спектра при передаче КПИ в условиях совместного действия широкополосных и узкополосных помех включает:

- 1) задание параметров сигнала f_0 , $\Delta F_{\text{с}}$, B , параметров узкополосной помехи $f_{\text{п}}$, $\Delta F_{\text{п}}$ и определение параметра узкополосной помехи η ;
- 2) задание отношений сигнал/шум q и сигнал/помеха $q_{\text{п}}$;
- 3) определение по величинам q , $q_{\text{п}}$, B и η эквивалентного отношения сигнал/шум $q_{\text{ЭКВ}}$;

- 4) задание используемых в канале передачи КПИ метода модуляции сигнала с расширением спектра при передаче символов сообщений и метода приема;
- 5) расчет по величине $q_{\text{экв}}$ показателей помехоустойчивости для заданных параметров информационного канала.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ СИМВОЛЬНОЙ ОШИБКИ В РАДИОКАНАЛЕ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ

Канал передачи КПИ в составе КИС функционирует как радиоканал передачи информации. При передаче формализованных сообщений исходным вероятностным показателем помехоустойчивости РТС передачи информации является вероятность символьной ошибки – вероятность ошибочного приема символа кода p_0 . На практике к величине p_0 предъявляются требования в виде $p_0 \leq p_{0\text{зад}}$, где $p_{0\text{зад}}$ – заданное максимально допустимое значение вероятности ошибочного приема символа при передаче сообщений определенного вида [11].

При корреляционном приеме сигналов в условиях совместного действия широкополосных и узкополосных помех вероятность символьной ошибки при приеме двоичного символа определяется выражениями:

- при когерентном приеме радиосигналов со слежением за их начальной фазой

$$p_0 = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\alpha q_{\text{экв}}} \right) \right]; \quad (14)$$

- при некогерентном приеме радиосигналов со случайной начальной фазой

$$p_0 = \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{\alpha q_{\text{экв}}}{2} \right). \quad (15)$$

В выражениях (14) и (15) параметр α характеризует метод модуляции сигнала при передаче символов сообщений, $\Phi(x)$ – функция Крампа (одна из форм интеграла ошибок),

$$\Phi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \exp \left(-\frac{u^2}{2} \right) du.$$

Данные выражения соответствуют известным выражениям для вероятности символьной ошибки при приеме двоичного символа в условиях белого гауссовского шума [5, 6] с использованием в них вместо отношения сигнал/шум q эквивалентного отношения сигнал/шум $q_{\text{экв}}$, определяемого по рассмотренной методике для учета совместного действия широкополосной и узкополосной помех.

Приведем в качестве примера результаты расчетов в соответствии с выражениями (14) и (15) величины p_0 в условиях совместного действия широкополосной и узкополосной помех. Узкополосная помеха характеризуется параметром η . Параметр α задается в соответствии с используемым в информационном канале КИС методом модуляции фазоманипулированных сигналов с расширением спектра для передачи символов двоичного кода. Использование для передачи двоичных символов инвертирования ПСП соответствует использованию противоположных сигналов, для которых $\alpha = 2$. Использование для передачи двоичных символов различных ПСП при их «хороших» взаимно корреляционных свойствах можно рассматривать как использование квазиортогональных сигналов, для которых $\alpha = 1$.

На рис. 3 приведены результаты расчетов вероятности p_0 в зависимости от отношения сигнал/помеха $q_{\text{п1}}$ при различных значениях параметра η узкополосной помехи. Задавались значения $q = 20$ и $q_{\text{п1}} \leq 10$, что соответствует определяющему влиянию на прием сигналов узкополосных помехи, при этом параметром $q_{\text{п1}}$ учитывается величина базы сигнала B . На рисунке

кривые 1 соответствуют $\eta = 1$, кривые 2 – $\eta = 0,75$, кривые 3 – $\eta = 0,5$, кривые 4 – $\eta = 0,25$. Сплошные линии соответствуют приему противоположных сигналов ($\alpha = 2$), штриховые линии – приему ортогональных сигналов ($\alpha = 1$). При прочих равных условиях величина p_0 всегда ниже для противоположных сигналов, чем для ортогональных сигналов, и ниже при когерентном приеме, чем при некогерентном приеме, что обусловлено более высокой потенциальной помехоустойчивостью противоположных сигналов и когерентного приема.

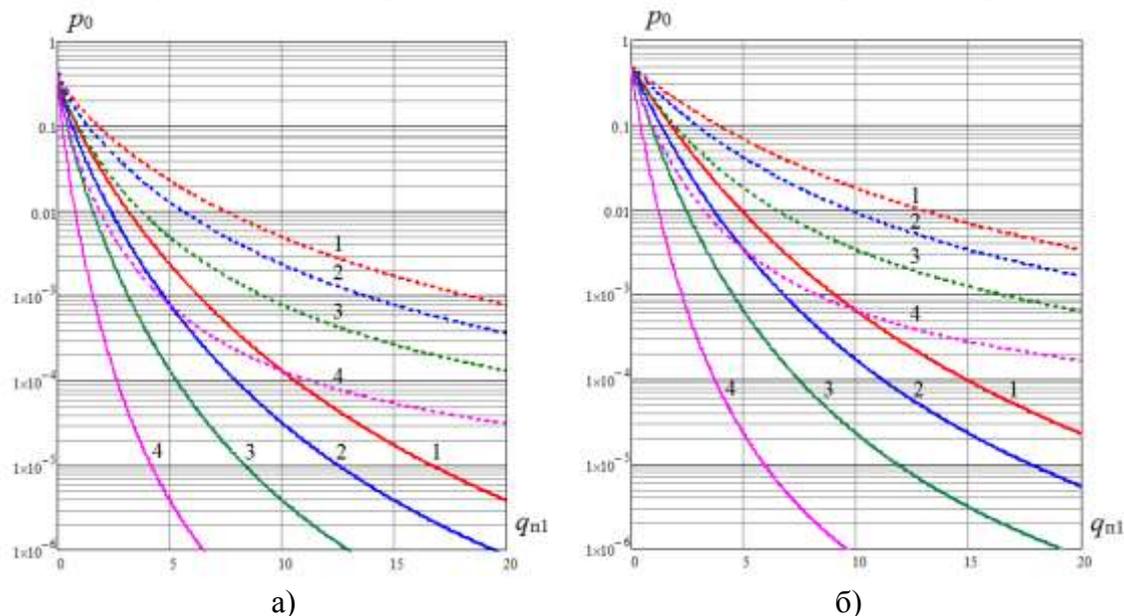


Рис. 3. Зависимости вероятности символьной ошибки при приеме двоичного символа от отношения сигнал/помеха на входе решающего устройства:
а – когерентный прием; б – некогерентный прием

Приведенные зависимости показывают существенное влияние параметра узкополосной помехи η на величину p_0 . При фиксированном значении $q_{п1}$ наибольшая величина p_0 имеет место при $\eta = 1$, а при уменьшении η от 1 до 0,25 в области значений $5 < q_{п1} < 15$ имеет место уменьшение величины p_0 на 2-3 порядка при когерентном приеме и на 1-2 порядка при некогерентном приеме. Это подтверждает важность учета частотных параметров узкополосных помех при анализе помехоустойчивости КИС и других типов РТС передачи информации, в которых используются сигналы с расширением спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный методический подход предназначен для анализа помехоустойчивости каналов передачи КПИ КИС и других типов РТС с фазоманипулированными сигналами с расширением спектра при их функционировании в условиях узкополосных помех. Методика основана на описании условий приема сигналов с использованием эквивалентного отношения сигнал/шум, по которому могут быть рассчитаны вероятностные показатели помехоустойчивости. В эквивалентном отношении сигнал/шум широкополосная помеха характеризуется отношением сигнал/шум, а узкополосная помеха характеризуется отношением сигнал/помеха и дополнительным параметром, который зависит от частотных параметров помехи.

Рассмотренная методика может быть использована при аналитической оценке вероятностных показателей помехоустойчивости РТС передачи информации, в которых используются фазоманипулированные сигналы с расширением спектра, в условиях действия различных естественных и преднамеренных помех.

Список используемых источников

1. *Галантерник Ю. М., Горюш А. В., Калинин А. Ф.* Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами. – М. : МГУЛ, 2003. – 200 с.
2. *Молотов Е. П.* Наземные радиотехнические системы управления космическими аппаратами. – М. : Физматлит, 2004. – 256 с.
3. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов [и др.]; под ред. В. И. Борисова. – М. : Радиософт, 2011. – 552 с.
4. *Куприянов А. И., Сахаров А. В.* Теоретические основы радиоэлектронной борьбы. – М. : Вузовская книга, 2007. – 356 с.
5. Теория передачи сигналов / А. Г. Зюко [и др.]. – М. : Радио и связь, 1986. – 304 с.
6. Радиосистемы передачи информации / В. А. Васин [и др.]; под ред. И. Б. Федорова и В. В. Калмыкова. – М. : Горячая линия–Телеком, 2005. – 472 с.
7. *Пышкин И. М.* Теория кодового разделения сигналов. – М. : Связь, 1980. – 208 с.
8. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г. И. Тузов [и др.]; под ред. Г. И. Тузова. – М. : Радио и связь, 1985. – 264 с.
9. *Ипатов В. П.* Широкополосные системы и кодовое разделение каналов. Принципы и приложения. – М. : Техносфера, 2007. – 488 с.
10. *Борисов В. И., Зинчук В. М.* Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. – М. : РадиоСофт, 2008. – 260 с.
11. *Вейцель В. А.* Теория и проектирование радиосистем радиоуправления и передачи информации. – М. : Горячая линия–Телеком, 2018. – 182 с.

Ю. Н. Копалов,
кандидат технических наук;
П. А. Маслаков,
кандидат технических наук;
А. В. Паршуткин,
доктор технических наук, профессор

МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАНАЛА СВЯЗИ С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ (OFDM) В УСЛОВИЯХ ЭПИЗОДИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ С ПОТОКОМ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

В статье предложена модель влияния нестационарных непреднамеренных помех на прием сигналов с OFDM в условиях эпизодической синхронизации кадров, передаваемых в канале связи, и помехи. Представлен расчет вероятности ошибочного приема кадра от отношения сигнал/помеха, а также от длительности импульса помехи. Показано, при каких соотношениях длительности импульса помехи и длительности кадра вероятность ошибочного приема кадра увеличивается за счет роста числа ошибок при приеме служебных частей кадров.

Ключевые слова: OFDM, помехоустойчивость, эпизодическая синхронизация.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из активно развивающихся направлений в телекоммуникации является создание низкоорбитальных многоспутниковых систем связи, обеспечивающих непрерывный высокоскоростной доступ пользователей в сеть «Интернет». Примерами подобных систем являются как уже функционирующие *Starlink* и *OneWeb* [1], так и планируемые к развертыванию в краткосрочной перспективе системы *Kuiper*, *GuoWang*, *Telesat Lightspeed* [2–4]. Планируется развертывание отечественной системы компанией «Бюро 1440» [5]. Особенностью данных систем является использование при формировании каналов связи сигналов с ортогональным частотным разделением (OFDM).

Влияние стационарных шумовых помех на прием сигналов с OFDM рассмотрено в работах [6–11]. Вместе с тем, повсеместное распространение радиолокационных систем различного назначения обуславливает необходимость исследования влияния на каналы связи с OFDM нестационарных непреднамеренных импульсных помех (НИП) [12].

Данная статья является продолжением работы [13], в которой авторами исследовано влияние НИП на прием информации в условиях эпизодической синхронизации (ЭС) кадров стандарта DVB-S2 с потоками импульсных помех и предложена соответствующая аналитическая модель. Однако данная модель не в полной мере применима к кадрам, в основе которых лежат OFDM-символы. Поэтому разработка модели функционирования канала связи с OFDM в условиях НИП является актуальной.

В статье на примере структуры кадров, используемой в системе *Starlink*, показано, каким образом шум и НИП влияют на условные вероятности ошибок при приеме различных частей кадра:

- синхрогруппы (СГ);
- служебной (СЧК) части кадра;
- информационной (ИЧК) части кадра.

Также представлены зависимости вероятности ошибочного приема кадра от отношения сигнал/помеха (ОСП) при фиксированном отношении сигнал/шум и от длительности непреднамеренных импульсных помех.

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НА ПРИЕМ СИГНАЛОВ С OFDM В УСЛОВИЯХ ЭПИЗОДИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ КАДРОВ С ИМПУЛЬСАМИ ПОМЕХИ

ЭС кадров сигнала с НИП возникает, когда воздействие НИП совпадает во времени с приемом СГ и СЧК на интервале в несколько периодов повторения кадров [13].

Пусть на вход приемника поступает $y(t)$ – смесь сигнала $s(t)$, НИП в виде периодической последовательности импульсов $p(t)$ и шумов $n(t)$:

$$y(t) = s(t) + p(t) + n(t), \quad (1)$$

где НИП имеет длительность импульсов τ_p и период их повторения T_p :

$$p(t) = \begin{cases} \chi(t), & \text{при } jT_p \leq t \leq (jT_p + \tau_p); \\ 0, & \text{при } (jT_p + \tau_p) < t < (j+1)T_p, \end{cases} \quad (2)$$

где $\chi(t)$ – случайный шумовой процесс. При этом исследование ограничено рассмотрением ситуации, когда на один кадр сигнала воздействует только один импульс НИП.

В статье расчеты проведены на примере структуры кадров, используемой в системе *Starlink* [14]. Пример возникновения интервалов ЭС кадров и НИП в подобном канале связи представлен на рис. 1.

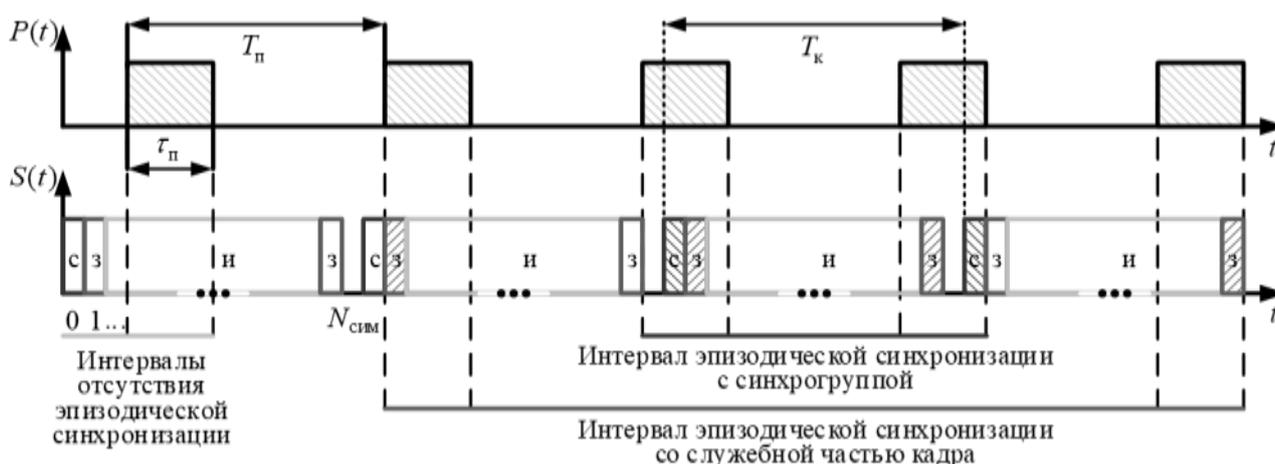


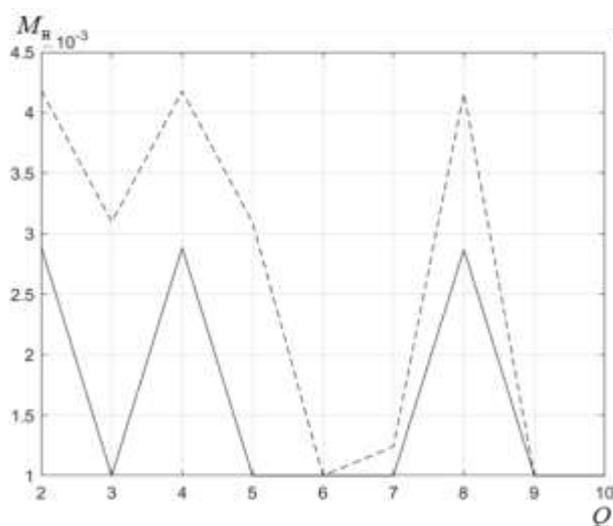
Рис. 1. Возникновение интервалов ЭС кадров с НИП

На рис. 1 приняты следующие обозначения: T_p – период следования импульсов НИП; τ_p – длительность импульса НИП. В структуре кадра обозначены: «с» – СГ, «з» – СЧК, «и» – ИЧК. Сигнал $s(t)$ состоит из кадров длительностью T_k , включающих $N_{\text{симв}}$ символов OFDM.

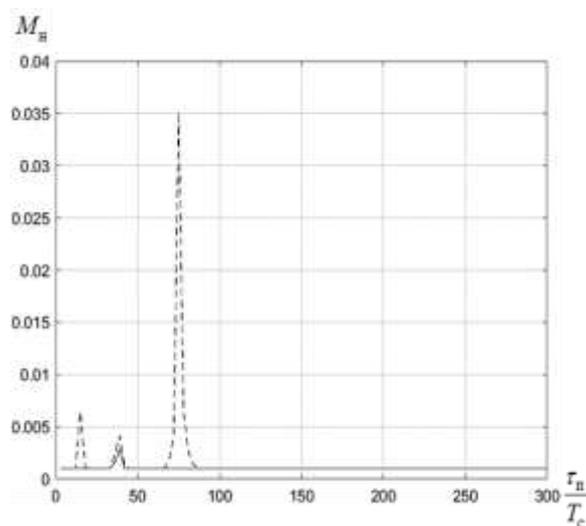
Следовательно, интервал ЭС представляет собой интервал времени приема кадров, в который СГ или СЧК каждого кадра подряд совпадают во времени с приемом импульсов НИП. Необходимость рассмотрения такой ситуации обусловлена относительно малой длительностью СГ и СЧК и высокой динамичностью изменения задержек распространения сигнала.

Оценка параметров ЭС НИП и СГ и СЧК произведена с использованием выражений, представленных в работе [13]. Полученные результаты представлены на рис. 2–5. При этом на рис. 2 и 3 сплошная линия соответствует значениям параметров ЭС с СГ, а штриховая линия – ЭС с СЧК.

На рис. 2 используются следующие обозначения: Q – скважность НИП, $Q = T_{\text{п}}/\tau_{\text{п}}$; $M_{\text{н}}$ – нормированное к числу кадров на интервале наблюдения математическое ожидание длительности интервала ЭС; T_c – длительность OFDM-символа.



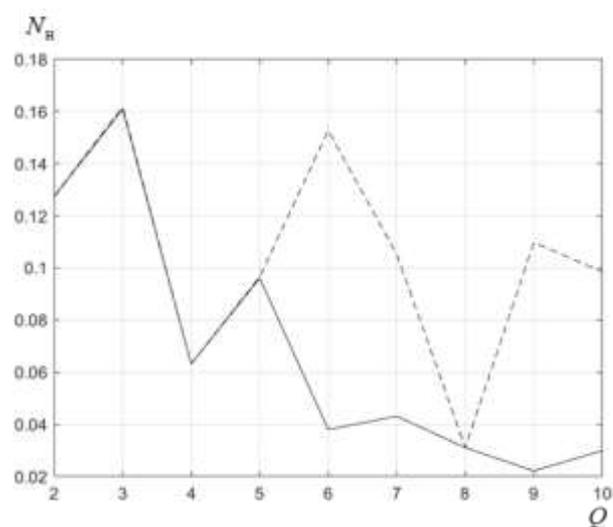
а)



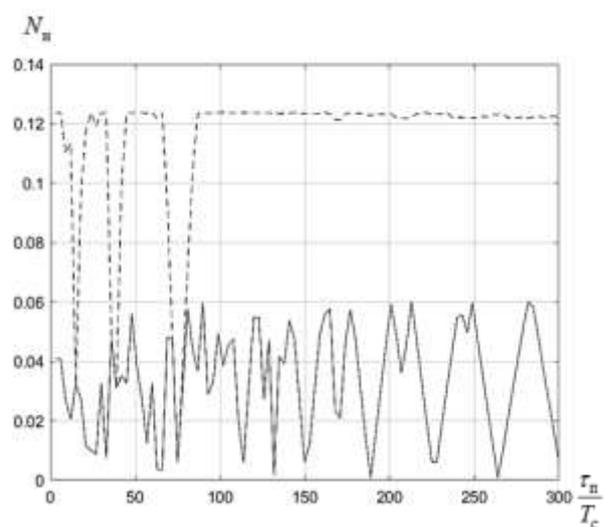
б)

Рис. 2. Зависимости средней длительности интервала ЭС:
а – от скважности НИП; б – от отношения длительности импульса НИП
к длительности OFDM-символа при $Q = 8$

На рис. 3 нормированное к числу кадров на интервале наблюдения число интервалов ЭС обозначено как $N_{\text{н}}$, а на рис. 4 нормированное число символов, составляющих СГ и СЧК, подвергшихся воздействию НИП, – как $N_{\text{пЛ}}$.



а)



б)

Рис. 3. Зависимости числа интервалов ЭС:
а – от скважности НИП; б – от отношения длительности импульса
НИП к длительности OFDM-символа при $Q = 8$

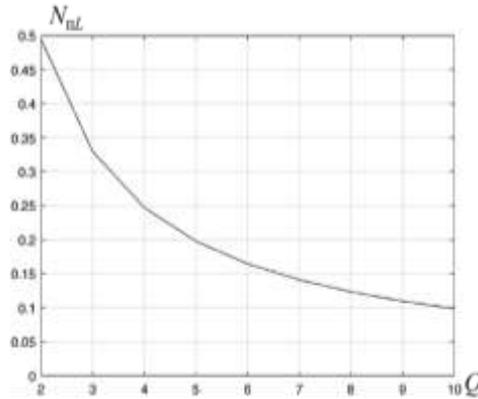


Рис. 4. Зависимость доли символов СГ и СЧК, на которые на заданном интервале наблюдения воздействует НИП, от ее скважности

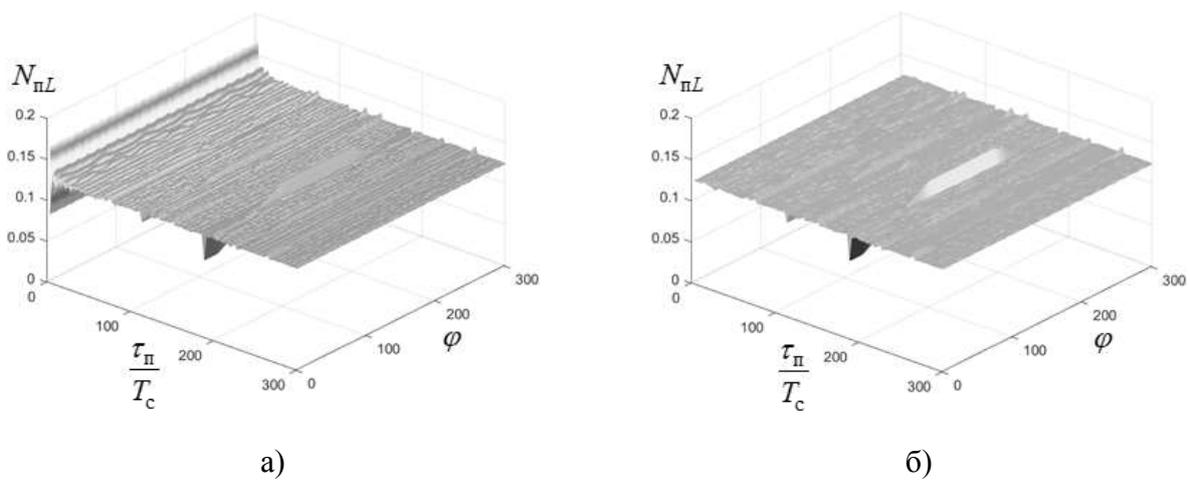


Рис. 5. Зависимости нормированного числа символов, подвергшихся воздействию НИП, от отношения длительности импульса НИП к длительности OFDM-символа и начального положения первого импульса НИП при $Q = 8$:
а – для СГ; б – для СЧК

Из полученных результатов следует, что математическое ожидание числа кадров на отдельно взятом интервале ЭС и число таких интервалов зависит, в основном, от значений скважности и длительности импульса НИП, а от начального положения первого импульса НИП зависит незначительно. Среднее значение нормированного числа символов, подвергшихся воздействию НИП, определяется только значением ее скважности.

При расчете вероятности потери кадра в условиях воздействия НИП был использован подход, подробно раскрытый в работе [13]. Отличия в математической модели обусловлены только особенностями структуры кадров передаваемого сигнала.

Так, информационный сигнал $s(t)$ состоит из кадров длительностью T_k , включающих $N_{\text{сим}}$ OFDM-символов длительностью T_c каждый (как для ИЧК, так и для СЧК) и СГ:

$$T_k = N_{\text{сим}} T_c = \frac{2N_{\text{пс}}}{\Delta F_c} + N_{\text{ofdm}}^{\text{зар}} T_c + N_{\text{ofdm}} T_c \quad (3)$$

где $N_{\text{пс}}$ – число посылок СГ;
 N_{ofdm} – число информационных символов OFDM в кадре;
 $N_{\text{ofdm}}^{\text{зар}}$ – число служебных символов OFDM в кадре;
 ΔF_c – ширина спектра сигнала.

Пусть вероятность ошибочного приема (ВОП) кадра рассчитывается по формуле [13]

$$P_{ок} = 1 - (1 - P_{ос})(1 - P_{оз})(1 - P_{ои}). \quad (4)$$

В формуле (4) введены следующие обозначения: $P_{ос}$ – ВОП СГ, $P_{оз}$ – ВОП СЧК (заголовка), $P_{ои}$ – ВОП ИЧК, которые определяются формулами:

$$P_{ос} = P_{пс} P_{ошс}, \quad P_{оз} = P_{пз} P_{ошз}, \quad P_{ои} = P_{пи} P_{оши}, \quad (5)$$

где $P_{пс}, P_{пз}, P_{пи}$ – вероятности попадания НИП в СГ, СЧК и ИЧК соответственно;
 $P_{ошс}, P_{ошз}, P_{оши}$ – условные вероятности ошибок при приеме СГ, СЧК и ИЧК при условии попадания НИП в соответствующую часть кадра.

С учетом того, что в рассматриваемом случае OFDM-символы СЧК расположены в начале и окончании кадра соответственно, вероятность попадания НИП в различные части кадра вычисляется по формулам:

$$P_{пс} = P_{пк} / N_{сим}; \quad P_{пз} = 1 - (1 - P_{пк} / N_{сим})^2; \quad P_{пи} = P_{пк} N_{ofdm} / N_{сим}, \quad (6)$$

где $P_{пк}$ – вероятность того, что НИП попадет в кадр,

$$P_{пк} = \begin{cases} T_k / T_{п}, & \text{при } T_{п} \geq T_k; \\ 1, & \text{при } T_{п} < T_k. \end{cases} \quad (7)$$

В свою очередь, ВОП СГ будет определяться выражением

$$P_{ошс} = \Phi \left(\sqrt{\frac{2N_{пс} E_s}{N_0 + N_{пс} D_0 / N_{пс}}} (u_c - 1) \right). \quad (8)$$

где $\Phi()$ – функция Лапласа;
 $N_{пс}$ – число символов СГ;
 E_s – энергия одного символа СГ;
 $N_{пс}^n$ – число символов СГ, подвергшееся воздействию НИП;
 N_0, D_0 – спектральные плотности мощности шума и НИП;
 u_c – нормированный порог обнаружения СГ.

При расчете ВОП СЧК и ИЧК необходимо учитывать средства канального кодирования. Для того чтобы оценить исправляющую способность кодов коррекции ошибок используется граница Хэмминга [15–17]:

$$U_{и} = \left\lfloor \frac{4nh^{-1}(1-R)-1}{2} \right\rfloor, \quad (9)$$

где n – длина кодового слова;
 h^{-1} – функция, обратная бинарной информационной энтропии [17];
 R – скорость кодирования.

Тогда ВОП ИЧК примет вид

$$P_{оши} = 1 - \sum_{i=0}^{\min(U_{и}, N_{и} - N_{и}^n)} \left(C_{N_{и} - N_{и}^n}^i p_{ber}^{ш i} (1 - p_{ber}^{ш})^{N_{и} - N_{и}^n - i} \sum_{j=0}^{\min(U_{и} - i, N_{и}^n)} C_{N_{и}^n}^j p_{ber}^{п j} (1 - p_{ber}^{п})^{N_{и}^n - j} \right), \quad (10)$$

где $N_{и}$ – число правильно принятых информационных двоичных символов;
 $N_{и}^n$ – число информационных двоичных символов, подвергшихся воздействию НИП;
 $U_{и}$ – исправляющая способность помехоустойчивого кода;
 $p_{ber}^{ш}$ – вероятность ошибки на бит при приеме ИЧК на фоне только шума;
 $p_{ber}^{п}$ – вероятность ошибки на бит при приеме ИЧК на фоне НИП и шума одновременно.

Соответственно, ВОП СЧК, которая также представляет собой OFDM-символы, примет вид

$$P_{\text{ошз}} = 1 - \sum_{i=0}^{\min(U_n, N_3 - N_3^n)} \left(C_{N_3 - N_3^n}^i p_{\text{бер}}^{\text{ш } i} (1 - p_{\text{бер}}^{\text{ш}})^{N_3 - N_3^n - i} \sum_{j=0}^{\min(U_n - i, N_3^n)} C_{N_3^n}^j p_{\text{бер}}^{\text{п } j} (1 - p_{\text{бер}}^{\text{п}})^{N_3^n - j} \right), \quad (11)$$

где N_3 – число правильно принятых служебных двоичных символов;

N_3^n – число служебных двоичных символов, подвергшихся воздействию НИП.

Известно, что при приеме сигналов с OFDM на фоне аддитивного белого гауссовского шума вероятность ошибки на бит зависит только от вида модуляции, используемого на каждой поднесущей, и для фазовой манипуляции может быть определена как [18]

$$P_{\text{бер}}^{\text{ш}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2}{\log_2(M)} \Phi \left(\sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \sqrt{\frac{2E_b \log_2(M)}{N_0}} \right), \quad (12)$$

где N – число информационных поднесущих в сигнале с OFDM;

M – позиционность манипуляции на каждой поднесущей;

E_b – энергия информационного бита.

С использованием приведенных выражений были рассчитаны ВОП СГ, СЧК и ИЧК, а также ВОП кадра в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ НА ПРИЕМ СИГНАЛОВ С OFDM В УСЛОВИЯХ ЭПИЗОДИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ КАДРОВ С ИМПУЛЬСАМИ ПОМЕХИ

При проведении расчетов в качестве исходных данных использовались сведения о структуре кадров, приведенные в работе [14]. Полученные результаты приведены на рис. 6–9. Данные зависимости представляют собой ВОП различных частей кадра и кадра в целом от отношения длительности импульса НИП к длительности OFDM-символа при фиксированных ОСП.

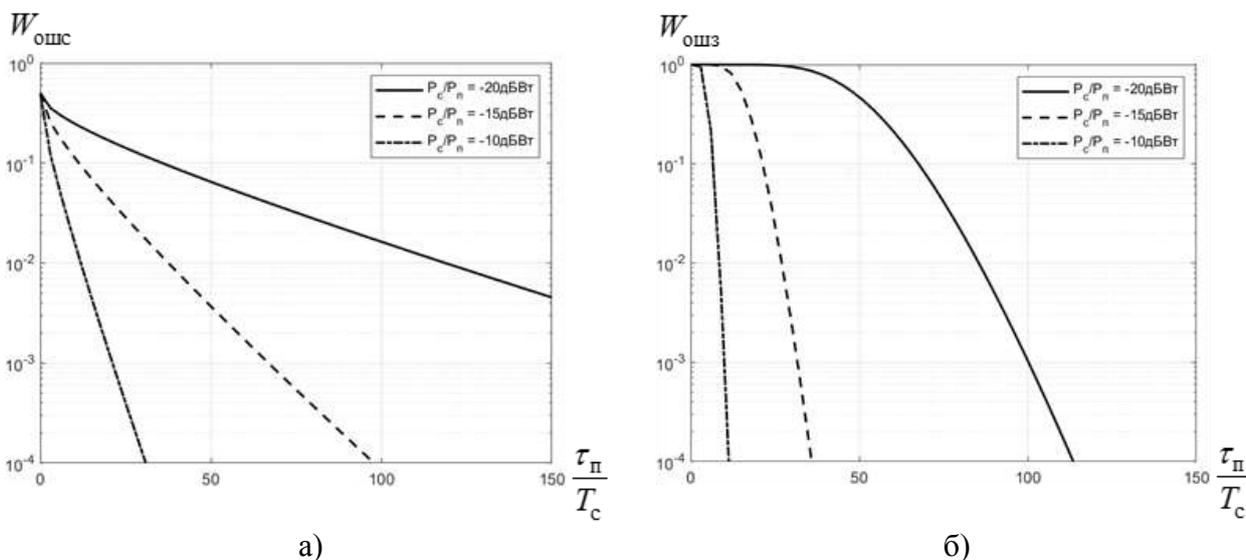


Рис. 6. Зависимости ВОП СГ (а) и СЧК (б) от отношения длительности импульса НИП к длительности OFDM-символа при фиксированном ОСП

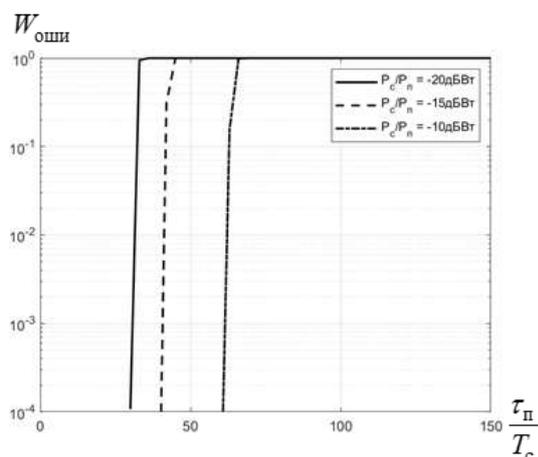


Рис. 7. Зависимость ВОП ИЧК от отношения длительности импульса НИП к длительности OFDM-символа при фиксированном ОСП

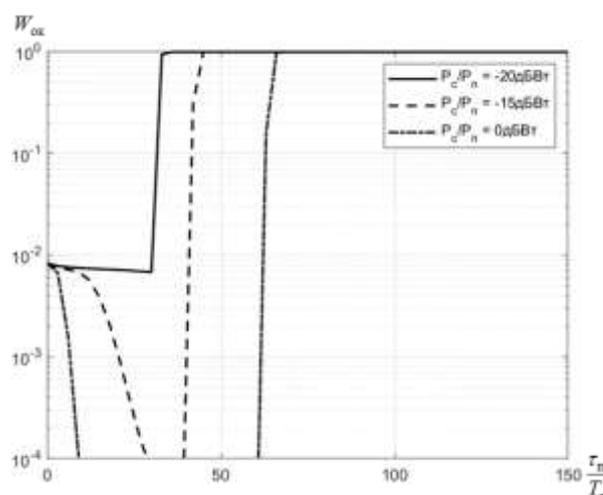


Рис. 8. Зависимость ВОП кадра от длительности импульса НИП

Из полученных зависимостей следует, что увеличение длительности импульса НИП приводит к уменьшению ОСП, при котором достигается заданный уровень вероятности ошибки. Это происходит из-за снижения доли энергии НИП, воздействующей на СГ. При этом, чем больше длительность импульса НИП, тем быстрее убывает ВОП СЧК в сравнении с ВОП СГ, поэтому для различных ОСП существует такое значение длительности импульса НИП, при котором вклад ВОП СГ в итоговое значение ВОП кадра становится более значительным по сравнению с ВОП СЧК.

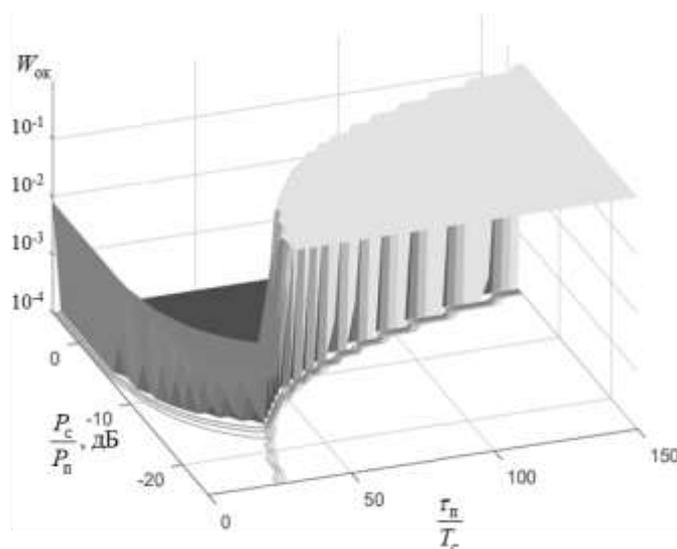


Рис. 9. Зависимость ВОП кадра от ОСП и длительности импульса НИП

ВОП ИЧК имеет пороговый характер, определяемый исправляющей способностью применяемого помехоустойчивого кода, а от длительности импульса НИП зависит незначительно. Для заданного значения ВОП ИЧК с увеличением ОСП значение длительности импульса НИП, при которой обеспечивается правильный прием ИЧК, также увеличивается.

Следовательно, при воздействии НИП с длительностью импульсов, существенно превышающей длительности СГ и СЧК, основной вклад в ВОП кадра вносит ВОП ИЧК. Однако при низких ОСП вероятность потери кадра при воздействии НИП малой длительности импульса, не превышающей 10–15% длительности кадра, определяется ВОП СГ и СЧК. Поэто-

му воздействие коротких импульсов НИП на СГ и СЧК может привести к более высокой вероятности потери кадра в сравнении с приемом сигналов с OFDM в канале связи только на фоне шумов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описана аналитическая модель функционирования отдельного канала связи на основе технологии OFDM в условиях ЭС кадров канального уровня с НИП.

Результаты анализа эффекта ЭС позволяют сделать вывод, что математическое ожидание числа кадров на отдельно взятом интервале ЭС, а также число интервалов ЭС определяются значениями скважности и длительности импульса НИП, а от начала первого импульса НИП на интервале наблюдения зависят незначительно.

Характер полученных зависимостей ВОП различных частей кадра и кадра в целом от длительности импульса НИП определяется структурой кадра. Ключевыми параметрами при этом являются число символов в СГ, вид и длительность СЧК, а также отношение длительности СЧК к длительности ИЧК.

Таким образом, в статье показано, что при значениях длительности импульса НИП, составляющих величину от пропорциональной длительности СЧК или СГ до 10–15% длительности кадра, воздействие НИП на СЧК может приводить к тому, что ВОП кадра будет более высокой, чем при воздействии такой НИП только на ИЧК.

Список используемых источников

1. Низкоорбитальные спутниковые системы связи Starlink и OneWeb / Л. О. Мырова [и др.] // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2021. – № 2. – С. 36–45.
2. Telesat Lightspeed. – URL: <http://www.ofcom.org.uk/TELSAT-NET-1-Annex.pdf> (дата обращения: 07.11.2024).
3. Application for Authority to Launch and Operate a Non-geostationary Satellite Orbit System in KA-band Frequencies / J. D. Hindin [et al.] // FCC Materials. – 2019. – P. 1–36.
4. *Julienne M.* China in the Race to Low Earth Orbit: Perspectives on the Future Internet Constellation Guowang // *Asie.Visions.* – 2023. – № 136. – P. 1–23.
5. Создание российского аналога Starlink оценили почти в 445 млрд. рублей. – URL: http://rbc.ru/s/technology_and_media/17/09/2024/66e8671f9a79472a671f62eb (дата обращения: 07.11.2024).
6. *Носов В. И.* Методы повышения помехоустойчивости систем радиосвязи с использованием технологии ММО и пространственно-временной обработки сигнала : моногр. – Новосибирск : СибГУТИ, 2014. – 316 с.
7. *Pandey A., Sharma S.* BER Performance of OFDM System in AWGN and Rayleigh Fading Channel // *International Journal of Engineering Trends and Technology.* – 2014. – Vol. 13, № 3. – P. 126–128.
8. *Siddhaling V.M.* BER Performance for FFT and Wavelet Based OFDM Systems over AWGN Channel // *International Journal of Research and Scientific Innovation.* – 2015. – Vol. 2, № 8. – P. 52–54.
9. Влияние ошибки оценивания несущей частоты на качество приема сигналов с OFDM-модуляцией / К. В. Семенов [и др.] // *Журнал радиоэлектроники : электрон. журн.* – 2021. – № 10. – URL : <https://doi.org/10.30898/1684/1719.2021.10.4>. – Дата публикации: 27.12.2021.
10. Методика оценивания параметров сигналов с OFDM-модуляцией / С. С. Старицын [и др.] // *Журнал радиоэлектроники : электрон. журн.* – 2020. – № 6. – URL : <https://doi.org/10.30898/1684/1719.2020.6.12>. – Дата публикации: 08.09.2020.

11. *Житков И. В., Абакумов А. Н., Саниев Р. Р.* Метод оценивания параметров OFDM сигналов в условиях радиомониторинга // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXVII Международной научно-техн. конф., посвященной 60-летию полетов в космос Ю. А. Гагарина и Г. С. Титова. – Воронеж : ВГУ, 2021. – С. 144–151.
12. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем и комплексов : учеб. пособие / А. В. Паршуткин [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 148 с.
13. *Паршуткин А. В., Бучинский Д. И., Копалов Ю. Н.* Модель функционирования канала спутниковой связи в условиях эпизодической синхронизации с потоками импульсных помех // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 1. – С. 194–225.
14. Signal Structure of the Starlink Ku-Band Downlink / Т. Е. Humphreys [et al.]. – Austin : The University of Texas, 2022. – 14 p.
15. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
16. *Madiman M., Marcus A., Tetali P.* Entropy and Set Cardinality Inequalities for Partition-Determined Functions and Application to Sumsets // Random Structures and Algorithms. – 2012. – P. 399–424.
17. Exact and Approximated Outage Probability Analyses for Decode-and-Forward Relaying System Allowing Intra-Link Errors / X. Zhou [et al.] // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2014. – Vol. 13, № 12. – P. 7062–7071.
18. *Лузин В. И., Никитин Н. П., Гадзиковский В. И.* Основы формирования, передачи и приема цифровой информации : учеб. пособие. – М. : СОЛОН-Пресс, 2014. – 316 с.

О. И. Латанова;
А. Ю. Онуфрей,
доктор технических наук, профессор;
А. В. Разумов,
доктор технических наук, профессор;
В. Н. Шемякин,
кандидат военных наук

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Статья посвящена дальнейшему совершенствованию методического обеспечения при проведении исследований по оценке электромагнитной совместимости технических систем в условиях воздействия электромагнитных импульсов естественного и искусственного происхождения. Показано, что при решении задачи обеспечения электромагнитной совместимости технических систем в условиях воздействия электромагнитных импульсов необходимо также решать и задачи обеспечения стойкости технической системы к воздействию последовательности электромагнитных импульсов. Для этого предлагается аналитическая модель для расчета критериальных уровней стойкости радиоэлектронной аппаратуры технических систем в условиях накопления энергии последовательности электромагнитных импульсов, разработанная на основе закономерностей развития процессов накопления и «релаксации» энергии в полупроводниковых структурах при электромагнитном воздействии. Особенностью данной модели, по сравнению с ранее известными, является возможность проведения оценки электромагнитной совместимости не только при воздействии одиночных импульсов, но и при воздействии последовательности электромагнитных импульсов. Приведен пример расчета стойкости радиоэлектронной аппаратуры технических систем на основе предлагаемой модели.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, стойкость, техническая система, радиоэлектронная аппаратура, электромагнитный импульс, модель, критериальный уровень стойкости.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований в ходе разработки технических систем (ТС) является обеспечение их электромагнитной совместимости (ЭМС) в условиях воздействия непреднамеренных помех естественного и искусственного происхождения. Решение этой задачи предполагает проведение комплекса мероприятий по обеспечению ЭМС, начиная с этапов разработки технического задания на ТС, эскизного и технического проектирования и изготовления опытного образца.

Как правило, на всех этих этапах требования по обеспечению ЭМС регламентируются руководящими документами и ГОСТ [1, 2]. Анализ [1–3] показал, при решении задачи обеспечения электромагнитной совместимости технических систем в условиях воздействия электромагнитных импульсов необходимо также решать и задачи обеспечения стойкости технической системы к воздействию пачек мощных электромагнитных импульсов (ЭМИ).

Действующие стандарты определяют экспериментальный порядок оценивания устойчивости ТС в условиях воздействия пачек мощных электромагнитных и электрических импульсов микро- и наносекундной длительности, однако существующие расчетные методики не учитывают специфику воздействия пачек импульсов помех. При этом воздействие последовательности ЭМИ может снижать показатели стойкости за счет накопления энергии в элементной базе радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) ТС. В связи с этим электромагнитную совместимость целесообразно оценивать с учетом показателей стойкости, таких как вероятность отказа (при конкретном электромагнитном воздействии) или критериальные уровни стойкости, которые, в свою очередь, оцениваются через параметры электромагнитных импульсов,

или через их энергию. С учетом указанных обстоятельств, проведем оценку показателей стойкости в интересах обеспечения ЭМС.

Исследованию стойкости РЭА к воздействию ЭМИ посвящено достаточно большое количество работ [4–10]. Большинство из них посвящено теоретическому и экспериментальному исследованию стойкости элементной базы и отдельных конструктивных модулей и устройств ТС. Одним из важнейших направлений в исследовании стойкости является определение критериальных уровней стойкости РЭА ТС на основе изучения механизмов воздействия и закономерностей деградации аппаратуры в результате воздействия ЭМИ. В настоящее время различают два основных механизма поражения РЭА – тепловой и электрический пробой. Для оценки стойкости при тепловом пробое используется модель Вунша – Белла – Такса, которая позволяет учесть параметры электромагнитных импульсов при расчете критериальных уровней стойкости РЭА [5]. Оценка стойкости при электрическом пробое основывается на определении значений паразитных токов и напряжений, наводимых в цепях РЭА, приводящих к деградации и отказам в работе устройств ТС. Наиболее применяемой для этих целей является модель, отражающая зависимость значений критериальных уровней стойкости РЭА от параметров ЭМИ [6].

Рассмотренные модели вполне могут быть использованы при оценке стойкости РЭА ТС, однако существенным недостатком указанных моделей является то, что при оценке стойкости РЭА ТС не учитывается возможность воздействия последовательности ЭМИ, следующих с определенной частотой и длительностью. При таком воздействии следует рассматривать взаимодействие двух конкурирующих процессов: с одной стороны, процесса деградации РЭА в моменты воздействия, а с другой – процесса «релаксации» (восстановления) РЭА в моменты между воздействиями. Наиболее сложной для описания таких процессов является ситуация, когда оценка стойкости проводится при тепловом механизме влияния на РЭА. В этом направлении имеется ряд работ [7, 8]. Так, в работе [7] предлагается учитывать время повторения и количество ЭМИ при расчете прироста температуры полупроводника в результате воздействия последовательности ЭМИ. В работе [8] на основе экспериментальных исследований предлагается модель накопления повреждений (дефектов) в структуре полупроводника в зависимости от значений параметров ЭМИ. В качестве оценок результатов воздействий предлагается использовать дифференциальные характеристики выходных параметров РЭА.

Особенностью рассмотренных моделей является использование в расчетах конкретных значений параметров стойкости элементной базы РЭА, что на практике не всегда удается получить. Кроме того, в расчетных моделях рассматривается один конкретный элемент в составе исследуемого устройства или блока (наиболее уязвимый), тогда как в составе РЭА присутствует множество элементов различных типов, что не позволяет дать достоверную оценку стойкости ТС по всей совокупности РЭА. В связи с этим предлагается расчетная модель оценки стойкости РЭА к воздействию последовательности ЭМИ, основанная на соотношениях между параметрами ЭМИ и временем полного восстановления («релаксации») в РЭА, что позволяет упростить порядок расчета и не требует знания конкретных значений параметров РЭА.

Ниже приведены аналитические зависимости и модель оценки стойкости РЭА при воздействии последовательности ЭМИ и пример расчета показателя стойкости при варьировании параметрами ЭМИ.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Модель оценки стойкости РЭА при воздействии последовательности ЭМИ основана на допущении того, что мощность $P(\tau)$, рассеиваемая в РЭА в результате воздействия одиноч-

ным импульсом за время τ , значительно меньше, чем мощность $P(\tau_0)$, рассеянная за время полного восстановления («релаксации») τ_0 , при этом $\tau \ll \tau_0$ [9]. В случае, когда на РЭА действует последовательность ЭМИ с $\tau \ll \tau_0$, будет происходить процесс накопления энергии до уровня критического значения, при котором произойдет тепловой пробой в РЭА. В связи с этим целесообразно рассмотреть процесс накопления энергии в объекте воздействия на примере полупроводниковой структуры (ППС) как наиболее распространенной в РЭА. Для упрощения примем, что последовательность импульсов, имеющих одинаковую длительность τ , поступает с частотой F . Рассеиваемая при этом мощность $P(\tau)$ описывается функцией П-образного вида (прямоугольный импульс с мгновенными передним и задним фронтами) и не зависит от периода следования ЭМИ, т. е. $P(\tau)$ является величиной постоянной. Время «релаксации» после каждого воздействия не изменяется и равно τ_0 .

В этом случае энергия, накопленная в объеме ППС за время действия одного (первого) импульса, будет определяться выражением [9]

$$W_1 = \int_0^\tau P \exp\left(-\frac{\tau-t}{\tau_0}\right) dt = P \cdot \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right)\right), \quad (1)$$

где τ_0 – время «релаксации»;
 τ – длительность импульса;
 P – мощность импульса;
 t – момент времени начала накопления энергии.

После окончания импульса в результате процесса «релаксации» внутренняя энергия полупроводниковой структуры (ППС) уменьшается по экспоненциальному закону

$$W_1(t) = W_1 \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau_0}\right), \quad (2)$$

где t_1 – момент времени начала релаксации.

Рассеяние энергии в ППС будет продолжаться до момента времени $t_2 = 1/F$, когда приходит очередной (второй) ЭМИ, передающий в ППС очередную порцию энергии:

$$W_2 = P \cdot \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right)\right). \quad (3)$$

В этом случае к моменту окончания второго импульса в объеме ППС будет накоплена энергия, состоящая из суммы нерассеянной энергии первого импульса и энергии, переданной вторым импульсом, которая с учетом (2) и (3) рассчитывается по формуле

$$W_{\Sigma 2} = W_1(t) + W_2 = W_1 \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau_0}\right) + P \cdot \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right)\right). \quad (4)$$

После окончания второго импульса накопившаяся энергия рассеивается по закону $\exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau_0}\right)$ аналогично (2). Далее поступает третий импульс и к моменту его окончания суммарная энергия принимает значение

$$W_{\Sigma 3} = W_1 \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau_0}\right) + W_1 \exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau_0}\right) + P \cdot \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right)\right). \quad (5)$$

В общем случае при воздействии n импульсов выражение для определения накопленной энергии будет выглядеть следующим образом:

$$W_{\Sigma n} = W_1 \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau_0}\right) + W_1 \exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau_0}\right) + \dots$$

$$\dots + W_1 \exp\left(-\frac{t-t_{n-1}}{\tau_0}\right) + P \cdot \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right)\right). \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой степенной ряд, в котором каждый член характеризует вклад каждого импульса в энергию, накапливаемую в ППС, при воздействии последовательности ЭМИ. Используем данное выражение при формировании модели.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Для построения модели в выражении (6) проведем следующие преобразования: время воздействия τ выразим через параметры последовательности ЭМИ и введем переменную β , определяемую как

$$\beta = -\frac{1}{F\tau_0} = -\frac{Q\tau}{\tau_0},$$

где Q – скважность импульсов, $Q = (F\tau)^{-1}$.

В качестве критерия стойкости используем минимальное значение энергии, при воздействии которой происходит отказ в работе РЭА. Значения данного критерия для различных типов электро- и радиоизделий указаны в [3].

Последнее слагаемое в (6) представим в виде

$$P \cdot \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right)\right) = W_1 - W_1 \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right). \quad (7)$$

Если предположить, что с приходом n -го импульса накопленная в ППС энергия превзойдет $W_{кр}$, то второе слагаемое в (7) будет отсутствовать, так как процесс накопления энергии будет прекращен из-за теплового пробоя. В этом случае выражение (6) преобразуется к виду

$$W_{\Sigma n} = W_1(1 + \exp(\beta) + \exp(2\beta) + \dots + \exp((n-1)\beta)). \quad (8)$$

Согласно [11] сумма членов степенного ряда при $\beta \leq 0$ и $n \rightarrow \infty$ сходится к конечной сумме

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{nx} = \frac{1}{1 - e^x},$$

а при конечном значении n определяется выражением

$$\sum_{a=0}^n e^{ax} = \frac{1 - e^{x(n+1)}}{1 - e^x}.$$

В результате соответствующей подстановки, выражение (6) преобразуется к виду

$$W_{\Sigma n} = W_1 \frac{1 - \exp((n+1)\beta)}{1 - \exp(\beta)}, \quad (9)$$

где $W_{\Sigma n}$ – суммарная энергия, накапливаемая за n ЭМИ;

W_1 – энергия одного ЭМИ.

Выражение (9) представляет собой аналитическую модель оценки стойкости РЭА ТС к воздействию последовательности ЭМИ. Оно позволяет рассчитать значение энергии, накоп-

ливаемой в ППС за все время воздействия, сравнить его со значением критериального уровня энергии и дать заключение о стойкости РЭА.

Из анализа выражения (9) следует ряд практических рекомендаций, которые могут быть использованы при разработке средств защиты РЭА от воздействия ЭМИ. В частности, если предположить, что после прихода n -го импульса достигается значение критериального уровня энергии $W_{кр}$, то можно рассчитать во сколько раз возможно уменьшение энергии одного импульса в последовательности по отношению к одиночному импульсу, обеспечивающему достижение этого уровня. Данная задача возникает при разработке экранирующих защитных оболочек для устройств ТС. Для этого введем в рассмотрение коэффициент нормирования k , определяемый как отношение энергии одного импульса в последовательности к значению критериального уровня энергии:

$$k = \frac{W_1}{W_{кр}} = \frac{1 - \exp(\beta)}{1 - \exp((n+1)\beta)}. \quad (10)$$

Для примера на рис. 1 представлена зависимость коэффициента нормирования k от количества ЭМИ при заданных соотношениях параметров ЭМИ и объекта воздействия (β).

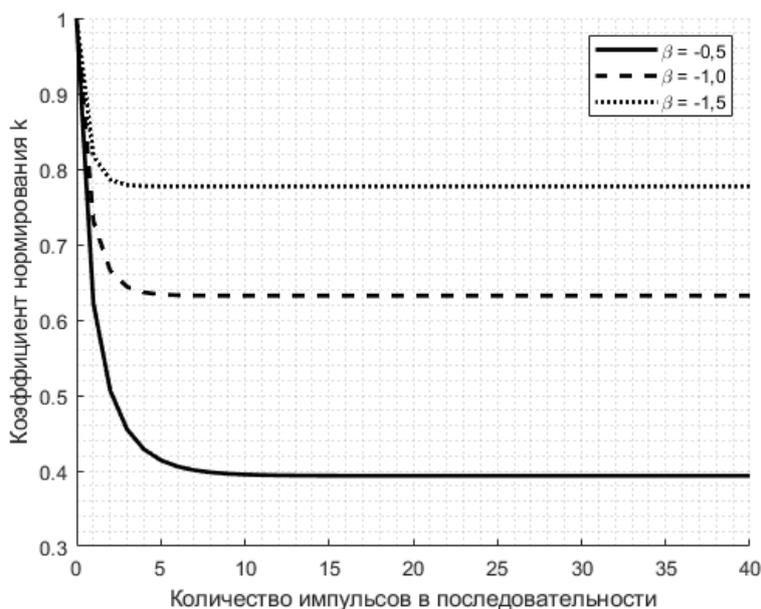


Рис. 1. Зависимость допустимого снижения энергии одного ЭМИ в последовательности по отношению к одиночному ЭМИ большой мощности

Как видно из рис. 1 максимально возможную энергию на ППС можно получить за ограниченное количество импульсов. Дальнейшее увеличение последовательности импульсов при заданных параметрах последовательности ЭМИ не увеличивает накопленную энергию.

Если рассмотреть граничные условия, допустим при $n \rightarrow \infty$, значение коэффициента будет минимальным:

$$k_{\min} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - \exp(\beta)}{1 - \exp((n+1)\beta)} = 1 - \exp(\beta) = 1 - \exp\left(-\frac{Q\tau}{\tau_0}\right). \quad (11)$$

В данном случае минимальное значение коэффициента показывает возможность накопления на ППС энергии, равной критериальной, при заданных значениях $W_{кр}$, W_1 и $\frac{\tau}{\tau_0}$, и если это возможно, то при каких параметрах. На рис. 2 представлены зависимости коэффициента нормирования от длительности и скважности ЭМИ параметров последовательности ЭМИ.

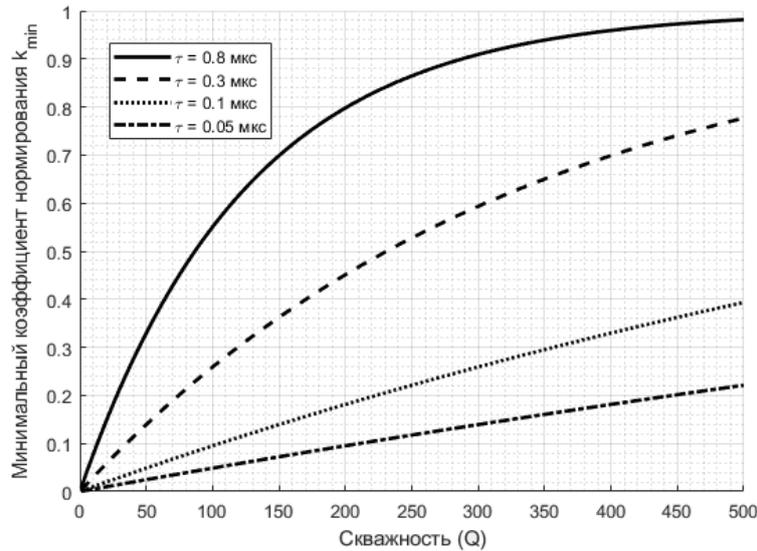


Рис. 2. Зависимость значения минимальной нормированной энергии импульса от длительности и скважности пачки импульсов на входе ППС при $\tau_0 = 100$ мс

Как видно из рис. 2, чем меньше скважность Q и τ , тем при меньших значениях k_{\min} происходит отказ в РЭА, т. е. требуется большая мощность импульса P .

При $k > k_{\min}$ критериальный уровень энергии достигается за конечное число n импульсов и определяется выражением

$$n = -\frac{\tau_0}{Q\tau} \ln \left(1 - \frac{k_{\min}}{k} \right) - 1. \quad (12)$$

Эти импульсы образуют последовательность ЭМИ длительностью t_{Π} :

$$t_{\Pi} = Q\tau n = -\tau_0 \ln \left(1 - \frac{k_{\min}}{k} \right) - 1. \quad (13)$$

На рис. 3 показаны результаты расчетов необходимого количества импульсов для достижения критериального уровня при следующих исходных данных: длительности импульса $\tau = 10$ мкс, времени релаксации $\tau_0 = 10$ мс, скважности импульсов $Q = 4$ и мощностей импульсов $P = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ кВт соответственно.

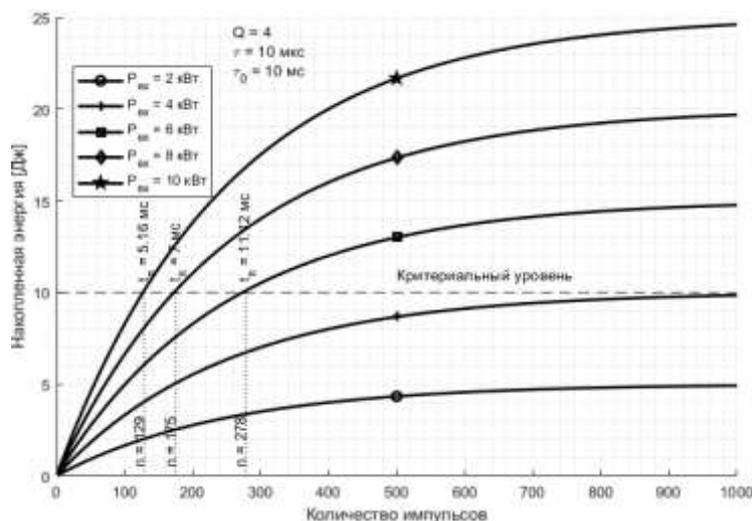


Рис. 3. Зависимость накопленной в ППС энергии от количества импульсов в последовательности

Как видно из рисунка, при мощности одиночного ЭМИ, позволяющего накопить в ППС энергию, превосходящую $W_{кр}$, возможно формирование конечной последовательности импульсов. В противном случае, даже при значительном увеличении числа импульсов устанавливается стационарное значение $W_{\Sigma n} < W_{кр}$, которое не приводит к разрушению ППС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные теоретические зависимости и разработанная на их основе модель оценки стойкости позволяют расширить возможности методического обеспечения при проведении исследований по электромагнитной совместимости РЭА технических систем в условиях воздействия последовательности ЭМИ, что характерно для современных условий эксплуатации ТС. Использование частоты следования импульсов совместно с длительностью и мощностью ЭМИ позволяет обеспечить более достоверную оценку показателей стойкости и ЭМС.

Модель может быть использована на ранних этапах проектирования ТС в ходе расчетной оценки стойкости и электромагнитной совместимости отдельных подсистем и устройств, а также при разработке средств по обеспечению защищенности ТС от воздействия ЭМИ.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 51317.1.5–2009 (МЭК61000–1–5:2004). Совместимость технических систем электромагнитная. Воздействия электромагнитные большой мощности на системы гражданского назначения. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2009. – 33 с.
2. ГОСТ 30804.4.4–2013 (МЭК 61000-4-4:2007). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2020. – 22 с.
3. *Мырова Л. О., Чепиженко А. З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М. : Радио и связь, 1988. – 296 с.
4. *Балюк Н. В., Кечиев Л. Н., Степанов П. В.* Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. – М. : Группа ИДТ, 2009. – 478 с.
5. *Добыкин В. Д.* Развитие теории теплового поражения полупроводниковых структур мощным электромагнитным излучением // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, № 1. – С. 108–111.
6. *Коробко А. И., Коробко З. И.* Оценка уровней стойкости радиоэлектронных компонентов к поражающему воздействию электромагнитного излучения, характерного для электромагнитного терроризма // Техника и электрофизика высоких напряжений : сб. науч. тр. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2009. – № 39. – С. 105–109.
7. *Волков А. А., Трифонов П. А.* Учет времени повторения и числа импульсов электромагнитного поля при оценке уровней стойкости радиоэлектронных средств в рамках тепловой модели // Вестник ВГУ. Сер. : Физика, математика. – 2015. – № 4. – С. 5–11.
8. *Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В.* Статистика повреждения СВЧ диодов импульсным радиоизлучением // Радиотехника. – 2010. – № 12. – С. 5–17.
9. *Усыченко В. Г., Сорокин Л. Н.* Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям : моногр. – М. : Радиотехника, 2017. – 288 с.
10. Модель воздействия электромагнитного излучения на оптико-электронные устройства телевизионных систем / А. В. Разумов [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер. : Техника телевидения. – 2017. – Вып. 3. – С. 95–102.
11. *Градштейн И. С., Рыжик И. М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М. : Физматгиз, 1962. – 1100 с.

С. В. Логунов,
кандидат технических наук

РАСШИРЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ПОРТРЕТА ГЕОСТАЦИОНАРНОГО ИСКУССТВЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье рассматриваются особенности построения фотометрического портрета геостационарного искусственного космического объекта на основе результатов наблюдения наземной оптической системой. Для классификации искусственных космических объектов предложено использовать результаты спектрофотометрических измерений в видимом диапазоне длин волн.

Ключевые слова: искусственный космический объект, звезда-стандарт, звездная величина, наземная оптическая система, сила излучения, спектрофотометрическая информация, фотометрический портрет.

ВВЕДЕНИЕ

Основным видом некоординатной информации (НКИ) об искусственных космических объектах (ИКО) является фотометрическая кривая блеска (ФКБ), когда измерение блеска осуществляется за счет регистрации яркости, изменяющейся во времени при изменении ракурса, наблюдаемого объекта. Однако при фотометрических наблюдениях, проводимых в интегральном свете, регистрируется только один параметр, характеризующий приходящее от ИКО излучение, – интенсивность светового потока, привязанная к текущему моменту времени. Это способствует поиску дополнительных характеристик, учет которых позволил бы существенно расширить возможности оптических наблюдений ИКО, повысив достоверность решения задач мониторинга космического пространства, являющегося ключевым элементом ситуационной оценки космической обстановки. Например, отличия в спектральных коэффициентах отражения материалов покрытий внешних элементов конструкции и разное соотношение между их размерами приводят к различию в спектрах отраженного от ИКО солнечного излучения.

В результате проведенной модернизации наземных оптических систем (НОС) появилась возможность получения нового вида оптической НКИ – спектрофотометрической, позволяющей по показателям цвета отличать объекты друг от друга вне зависимости от регистрируемого блеска и их удаленности от местоположения НОС [2].

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОРТРЕТ ИСКУССТВЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

В настоящее время все ИКО и сопровождающие их запуск фрагменты космического мусора (КМ), например, ступени ракет-носителей (РН) и разгонные блоки (РБ), составляют особую группу объектов, имеющих наивысший приоритет для наблюдения НОС.

Процедура классификации ИКО включает в себя разработку фотометрического портрета (ФМП), характеризующего каждый объект с учетом его состояния и включающего в себя только те признаки, относительно которых может быть получена априорная информация. ФМП можно сопоставить с любым ИКО с учетом типа стабилизации ИКО и параметров орбиты, существенно влияющих на характеристики принимаемых оптических сигналов. Например, зависимость силы излучения ИКО от его ориентации относительно Солнца и ОЭС. При рассмотрении в дальнейшем особенности классификации ИКО, расположенных в гео-

стационарной области (ГСО) и стабилизированных по трем осям, видно, что их ракурс относительно НОС практически не изменяется за относительно короткое время наблюдения, так как сканирование поверхности достигается только за счет изменения фазового угла Θ , связанного с их движением вокруг Земли. Условия подсветки объектов излучением Солнца непрерывны, но очень медленно изменяются в течение полугода, а затем повторяются [3]. В связи с этим алгоритмы классификации геостационарных ИКО упрощаются по сравнению с алгоритмами классификации низкоорбитальных ИКО, а результаты натурных оптических наблюдений ИКО удобно использовать при дальнейшем сопоставлении регистрируемого сигнала с ранее полученными данными.

Наиболее полным ФМП для ИКО в заданном спектральном диапазоне является зависимость его истинного приведенного отраженного сигнала $I(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ от значений четырех углов, в качестве которых могут быть приняты направляющие углы γ, δ линии «ИКО – Солнце» и направляющие углы α, β линии «ИКО – НОС», которые отсчитываются в системе координат, связанной со строительными осями ИКО. Совокупность значений этих углов обозначается далее четырехкомпонентным векторным аргументом $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$. Вектор $X_i = (x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i})^T$, который соответствует конкретным значениям x_1, x_2, x_3, x_4 , называется узлом четырехмерного векторного пространства $\{X\}$. Зависимость истинного значения регистрируемого сигнала от значений углов $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ называется функцией изменения сигнала и обозначается $I\{X\}$. Классификация ИКО по регулярной составляющей отраженного солнечного излучения может быть представлена:

1) как построение фотометрических эталонов (ФМЭ) всех ИКО, предъявляемых к классификации;

2) как классификация ИКО с использованием решающего правила, которое сводится к нахождению из имеющейся базы данных эталонного ИКО и минимизирующего квадратичную меру близости эталонных результатов наблюдений и аналогичных результатов, полученных при наблюдении классифицируемого ИКО.

ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ЭТАЛОНОВ ИСКУССТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НАЗЕМНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Классификация геостационарного ИКО, представляемого точечным источником, может проводиться как непосредственно по ФКБ, так и по признакам, определяемым из фотометрических реализаций. В первом случае необходимо иметь обширный каталог ФКБ по всевозможным ракурсам ИКО, что требует значительного объема памяти вычислительных средств. Значительно меньший объем памяти необходим для хранения информации при классификации ИКО по статистическим характеристикам, например, значениям приведенной освещенности, его блеска или отсчетов силы излучения.

Входными данными для построения ФМП являются отсчеты силы излучения ИКО, которые в направлении на НОС могут быть представлены в виде [4]

$$I_k^* = \{I_k^*(X_{k1}), I_k^*(X_{k2}), \dots, I_k^*(X_{kN_k})\}, k = 1 \dots M, \quad (1)$$

и выполнены для каждого из M известных ИКО в ограниченном числе N_k узлов.

Соответствующие значениям I_k результаты измерений I_k^* отличаются от истинных значений вследствие искажений сигнала при прохождении по трассе распространения и воздействия помех (излучения фона и внутренних шумов фотоприемника).

Классификация ИКО осуществляется путем сопоставления результатов измерения значений его признаков

$$I^* = [I^*(X_1), I^*(X_2), \dots, I^*(X_n)]^T \quad (2)$$

в n известных узлах X_1, X_2, \dots, X_n и эталонных значений сигнала в тех же узлах

$$\hat{I}_k = [\hat{I}_k(X_1), \hat{I}_k(X_2), \dots, \hat{I}_k(X_n)]^T, k = 1 \dots M \quad (3)$$

для всех M известных ИКО, к одному из которых может быть отнесен классифицируемый объект. Область пространства $\{X\}$, в которую входят узлы X_1, X_2, \dots, X_n классифицируемого ИКО, обозначается далее как $\{X\}_p$.

Рассмотрим алгоритм формирования ФМЭ, позволяющего по дискретным измерениям сигнала, проведенным в определенной области функционального пространства $\{X\}$, получить оценку регистрируемого сигнала для любых возможных значений X_i , входящих в эту область. Если известны результаты измерений классифицируемого ИКО в узлах $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}$, то узлы, в которых выполнялись измерения известных ИКО для построения их ФМЭ, практически никогда не совпадают с узлами измерений самого классифицируемого ИКО. Эти измерения, полученные для каждого ИКО, записываются в упорядоченном по значениям $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}$ порядке в виде следующего вектора измерений:

$$\vec{I}^* = \begin{pmatrix} I^*(\alpha_{11}, \beta_{11}, \gamma_{11}, \delta_{11}) \\ I^*(\alpha_{21}, \beta_{21}, \gamma_{21}, \delta_{21}) \\ \vdots \\ I^*(\alpha_{i1}, \beta_{i1}, \gamma_{i1}, \delta_{i1}) \\ \vdots \\ I^*(\alpha_{n1}, \beta_{n1}, \gamma_{n1}, \delta_{n1}) \\ \hline \vdots \\ \hline I^*(\alpha_{1j}, \beta_{1j}, \gamma_{1j}, \delta_{1j}) \\ I^*(\alpha_{2j}, \beta_{2j}, \gamma_{2j}, \delta_{2j}) \\ \vdots \\ I^*(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}) \\ \vdots \\ I^*(\alpha_{nj}, \beta_{nj}, \gamma_{nj}, \delta_{nj}) \\ \hline \vdots \\ \hline I^*(\alpha_{1N}, \beta_{1N}, \gamma_{1N}, \delta_{1N}) \\ I^*(\alpha_{2N}, \beta_{2N}, \gamma_{2N}, \delta_{2N}) \\ \vdots \\ I^*(\alpha_{iN}, \beta_{iN}, \gamma_{iN}, \delta_{iN}) \\ \vdots \\ I^*(\alpha_{nN}, \beta_{nN}, \gamma_{nN}, \delta_{nN}) \end{pmatrix},$$

где j — это номер сеанса наблюдения ИКО с помощью НОС, $j = \overline{1, N}$;
 N — общее число проведенных сеансов;

i – номер отсчета силы излучения в сеансе, $i = \overline{1, n_j}$;

n_j – номер отсчета силы излучения в j -м сеансе наблюдения.

Аппроксимация вектора измерений \vec{I}^* для произвольных значений $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ проводится методом наименьших квадратов с использованием полинома. Например, полином второй степени в рассматриваемом случае имеет вид

$$y(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = C_0 + C_1\alpha + C_2\beta + C_3\gamma + C_4\delta + C_5\alpha^2 + C_6\beta^2 + C_7\gamma^2 + C_8\delta^2 + C_9\alpha \cdot \beta + C_{10}\alpha \cdot \gamma + C_{11}\alpha \cdot \delta + C_{12}\beta \cdot \gamma + C_{13}\beta \cdot \delta + C_{14}\gamma \cdot \delta \quad (4)$$

Обработка измерений \vec{I}^* сводится к нахождению вектора коэффициентов аппроксимирующего полинома (4)

$$\vec{C} = \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_{14} \end{pmatrix} \quad (5)$$

и последующему восстановлению аппроксимирующей поверхности по формуле (4) для произвольных значений узлов $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.

Для тех же сочетаний дискретных значений узлов $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}$ и в той же последовательности (последовательности сеансов измерений и отсчетов результатов изменений в сеансах наблюдений), что и при формировании вектора \vec{I}^* , строится матрица координатных функций φ вида

$$\varphi = \begin{pmatrix} 1, \alpha_{11}, \beta_{11}, \gamma_{11}, \delta_{11}, \alpha_{11}^2, \beta_{11}^2, \gamma_{11}^2, \delta_{11}^2, \alpha_{11} \cdot \beta_{11}, \alpha_{11} \cdot \gamma_{11}, \alpha_{11} \cdot \delta_{11}, \beta_{11} \cdot \gamma_{11}, \beta_{11} \cdot \delta_{11}, \gamma_{11} \cdot \delta_{11} \\ 1, \alpha_{21}, \beta_{21}, \gamma_{21}, \delta_{21}, \alpha_{21}^2, \beta_{21}^2, \gamma_{21}^2, \delta_{21}^2, \alpha_{21} \cdot \beta_{21}, \alpha_{21} \cdot \gamma_{21}, \alpha_{21} \cdot \delta_{21}, \beta_{21} \cdot \gamma_{21}, \beta_{21} \cdot \delta_{21}, \gamma_{21} \cdot \delta_{21} \\ \vdots \\ 1, \alpha_{n_1}, \beta_{n_1}, \gamma_{n_1}, \delta_{n_1}, \alpha_{n_1}^2, \beta_{n_1}^2, \gamma_{n_1}^2, \delta_{n_1}^2, \alpha_{n_1} \cdot \beta_{n_1}, \alpha_{n_1} \cdot \gamma_{n_1}, \alpha_{n_1} \cdot \delta_{n_1}, \beta_{n_1} \cdot \gamma_{n_1}, \beta_{n_1} \cdot \delta_{n_1}, \gamma_{n_1} \cdot \delta_{n_1} \\ \hline \vdots \\ \hline 1, \alpha_{1j}, \beta_{1j}, \gamma_{1j}, \delta_{1j}, \alpha_{1j}^2, \beta_{1j}^2, \gamma_{1j}^2, \delta_{1j}^2, \alpha_{1j} \cdot \beta_{1j}, \alpha_{1j} \cdot \gamma_{1j}, \alpha_{1j} \cdot \delta_{1j}, \beta_{1j} \cdot \gamma_{1j}, \beta_{1j} \cdot \delta_{1j}, \gamma_{1j} \cdot \delta_{1j} \\ 1, \alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}, \alpha_{ij}^2, \beta_{ij}^2, \gamma_{ij}^2, \delta_{ij}^2, \alpha_{ij} \cdot \beta_{ij}, \alpha_{ij} \cdot \gamma_{ij}, \alpha_{ij} \cdot \delta_{ij}, \beta_{ij} \cdot \gamma_{ij}, \beta_{ij} \cdot \delta_{ij}, \gamma_{ij} \cdot \delta_{ij} \\ \vdots \\ 1, \alpha_{n_j}, \beta_{n_j}, \gamma_{n_j}, \delta_{n_j}, \alpha_{n_j}^2, \beta_{n_j}^2, \gamma_{n_j}^2, \delta_{n_j}^2, \alpha_{n_j} \cdot \beta_{n_j}, \alpha_{n_j} \cdot \gamma_{n_j}, \alpha_{n_j} \cdot \delta_{n_j}, \beta_{n_j} \cdot \gamma_{n_j}, \beta_{n_j} \cdot \delta_{n_j}, \gamma_{n_j} \cdot \delta_{n_j} \\ \hline \vdots \\ \hline 1, \alpha_{1N}, \beta_{1N}, \gamma_{1N}, \delta_{1N}, \alpha_{1N}^2, \beta_{1N}^2, \gamma_{1N}^2, \delta_{1N}^2, \alpha_{1N} \cdot \beta_{1N}, \alpha_{1N} \cdot \gamma_{1N}, \alpha_{1N} \cdot \delta_{1N}, \beta_{1N} \cdot \gamma_{1N}, \beta_{1N} \cdot \delta_{1N}, \gamma_{1N} \cdot \delta_{1N} \\ 1, \alpha_{2N}, \beta_{2N}, \gamma_{2N}, \delta_{2N}, \alpha_{2N}^2, \beta_{2N}^2, \gamma_{2N}^2, \delta_{2N}^2, \alpha_{2N} \cdot \beta_{2N}, \alpha_{2N} \cdot \gamma_{2N}, \alpha_{2N} \cdot \delta_{2N}, \beta_{2N} \cdot \gamma_{2N}, \beta_{2N} \cdot \delta_{2N}, \gamma_{2N} \cdot \delta_{2N} \\ \vdots \\ 1, \alpha_{n_N}, \beta_{n_N}, \gamma_{n_N}, \delta_{n_N}, \alpha_{n_N}^2, \beta_{n_N}^2, \gamma_{n_N}^2, \delta_{n_N}^2, \alpha_{n_N} \cdot \beta_{n_N}, \alpha_{n_N} \cdot \gamma_{n_N}, \alpha_{n_N} \cdot \delta_{n_N}, \beta_{n_N} \cdot \gamma_{n_N}, \beta_{n_N} \cdot \delta_{n_N}, \gamma_{n_N} \cdot \delta_{n_N} \end{pmatrix}$$

Таким образом, для расчета эталонных значений результатов измерений известных ИКО в тех же узлах по данным измерений \vec{I}_p^* формируется матрица координатных функций φ в уз-

лах измерений \vec{I}_p^* (α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij} , δ_{ij}). После этого вычисляются искомые эталонные значения силы излучения известных ИКО в узлах измерений \vec{I}_p^* :

$$\hat{I}_{\text{Эк}} = \varphi \cdot \hat{C}_k. \quad (6)$$

Здесь k – наименование ИКО, наблюдаемого НОС,

$$k = \overline{1, M},$$

где M – число объектов, предъявляемых для классификации;

\hat{C}_k – оценка вектора коэффициентов \vec{C}_k для k -го ИКО, полученная в соответствии с выражением

$$\hat{C} = (\varphi^T \cdot \varphi)^{-1} \cdot \varphi^T \cdot \vec{I}^*, \quad (7)$$

где \vec{C} – вектор коэффициентов аппроксимирующего полинома,

$$\vec{C} = \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_5 \end{pmatrix};$$

\vec{I}^* – вектор измерений,

$$\vec{I}^* = \begin{pmatrix} I^*(x_{11}, x_{21}) \\ I^*(x_{12}, x_{22}) \\ \vdots \\ I^*(x_{1n}, x_{2n}) \end{pmatrix};$$

φ – матрица координатных функций,

$$\varphi = \begin{pmatrix} 1, x_{11}, x_{21}, x_{11}^2, x_{21}^2, x_{11} \cdot x_{21} \\ 1, x_{12}, x_{22}, x_{12}^2, x_{22}^2, x_{12} \cdot x_{22} \\ \vdots \\ 1, x_{1n}, x_{2n}, x_{1n}^2, x_{2n}^2, x_{1n} \cdot x_{2n} \end{pmatrix}.$$

Использование четырехмерного ФМЭ позволяет также объединять данные измерений, полученные по двум (нескольким) однотипным ИКО, находящимся в разных точках стояния на ГСО. Данные измерений по второму объекту записываются при формировании вектора измерений \vec{I}^* , наравне с измерениями по первому ИКО. Порядок формирования вектора измерений \vec{I}^* может быть произвольным, необходимо лишь сохранить тот же порядок при формировании вектора координатных функций φ . Однако при этом необходимо устранить разницу в характеристиках отражения солнечного излучения ИКО, обусловленную воздействием факторов космического пространства (ФКП).

КЛАССИФИКАЦИЯ ИСКУССТВЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Классификация наблюдаемого ИКО по результатам измерения НОС его отраженного сигнала может проводиться либо путем непосредственного сопоставления измерений (2) с эталонными значениями (3) для каждого из M известных ИКО, либо путем сопоставления опре-

деленных функционалов измерений и эталонов, например, их спектрофотометрических характеристик.

При сопоставлении измерений силы излучения и эталонов или функционалов этих величин рассчитывается мера их близости для каждого из M известных ИКО. Наблюдаемый объект отождествляется с тем ИКО, для которого вычисляемая мера близости имеет экстремальное значение (максимальное или минимальное в зависимости от используемой меры близости). Потенциально наиболее эффективное решающее правило основано на использовании метода максимального правдоподобия. При этом методе классифицируемый ИКО отождествляется с таким известным объектом, при наблюдении которого в тех же узлах X_1, X_2, \dots, X_n получение значений признаков, соответствующих классифицируемому ИКО, наиболее вероятно.

Сопоставляемые векторы $\hat{I}_{\text{Эк}}$ и \vec{I}_p^* являются случайными вследствие ошибок измерений величин \vec{I}_{pi}^* и ошибок получения эталонов $\hat{I}_{\text{Эк}}$, при $i = 1, \dots, n$. Наиболее полным описанием сопоставляемых векторов \vec{I}_p^* и $\hat{I}_{\text{Эк}}$ являются законы распределения вероятностей компонентов этих векторов. Если эти законы известны, то наиболее результативным методом классификации ИКО является метод максимального правдоподобия, обеспечивающий минимальное значение вероятности его ошибочной классификации [5]. Этим методом вычисляется мера вероятности реализации полученного вектора измерений \vec{I}_p^* при условии наблюдения k -го ИКО, при $k = 1, \dots, M$. Эта мера равна соответствующему значению условной плотности вероятности $W(I_p^* / k)$. Классифицируемый ИКО отождествляется с объектом, для которого эта мера имеет наибольшее значение.

Плотность вероятности реализации вектора измерений в условиях наблюдения k -го ИКО определяется выражением

$$W(I_p^* / k) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |R_{\hat{I}_{\text{Эк}}} + R_{I_p^*}|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(I_p^* - \hat{I}_{\text{Эк}})^T (R_{\hat{I}_{\text{Эк}}} + R_{I_p^*})^{-1} (I_p^* - \hat{I}_{\text{Эк}})\right], \quad (8)$$

где $R_{\hat{I}_{\text{Эк}}}$ – корреляционная матрица погрешностей определения эталонных значений $\hat{I}_{\text{Эк}}$ силы излучения k -го ИКО в узлах X_1, X_2, \dots, X_n , полученных путем обработки измерений;
 $R_{I_p^*}$ – корреляционная матрица ошибок измерений силы излучения, наблюдаемого ИКО в тех же узлах;
 $\hat{I}_{\text{Эк}}, I_p^*$ – вектор эталонных значений силы излучения при наблюдении k -го ИКО в узлах X_1, X_2, \dots, X_n и вектор измеренных значений силы излучения наблюдаемого ИКО в тех же узлах соответственно.

При использовании рассматриваемого метода вместо $W(I_p^* / k)$ можно вычислять любую монотонную функцию этой величины:

$$L_k = \ln(I_p^* / k) = -\frac{n}{2} \cdot \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln |R_{\hat{I}_{\text{Эк}}} + R_{I_p^*}| - \frac{1}{2} (I_p^* - \hat{I}_{\text{Эк}})^T (R_{\hat{I}_{\text{Эк}}} + R_{I_p^*})^{-1} (I_p^* - \hat{I}_{\text{Эк}}). \quad (9)$$

При использовании в качестве аналога $W(I_p^* / k)$ функции, определяемой выражением (8), решение о том, что наблюдается μ -й объект, принимается при выполнении условия

$$L_\mu = \max_k L_k. \quad (10)$$

Если ошибки определения эталонных значений силы излучения ИКО существенно меньше ошибок единичных измерений, то можно считать, что

$$R_{\hat{I}_{\text{Эк}}} + R_{I_p^*} \approx R_{I_p^*}.$$

Если предварительная обработка результатов измерений наблюдаемого ИКО не производится, то матрица $R_{I_p^*}$ – диагональная с элементами $\sigma_{k1}^2, \sigma_{k2}^2, \dots, \sigma_{kn}^2$, где $\sigma_{ki}^2, i = 1, \dots, n$ – дисперсия ошибки измерения блеска k -го ИКО в узле X_i . При этом выражение (9) имеет вид

$$L_k = \frac{1}{2} \cdot \ln 2\pi - \sum_{i=1}^n \ln \sigma_{ki} - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(I_{pi}^* - \hat{I}_{\Delta ki})^2}{\sigma_{ki}^2}. \quad (11)$$

В рассматриваемых условиях при дополнительном предположении о том, что сумма $\sum_{i=1}^n \sigma_{ki}$ не зависит от индекса k , выдается решение о том, что наблюдается тот ИКО, для которого имеет минимальное значение величина (минимум по k)

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{(I_{pi}^* - \hat{I}_{\Delta ki})^2}{\sigma_{ki}^2}. \quad (12)$$

Следует отметить, что правила классификации наблюдаемого ИКО, основанные на вычислении величин (9) и (12), соответствуют условиям, когда полученные с использованием массива измерений регистрируемого сигнала (силы излучения) ИКО

$$I = I(\alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (13)$$

оценки $\hat{I}_{\Delta ki}$ являются несмещенными. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы ряд (4), аппроксимирующий функцию $I_k(X)$, достаточно точно определял значения этой функции в узлах X_i . Если нет уверенности в том, что указанное требование выполнено, то использование при классификации ИКО величин (9) и (12) нельзя считать оправданным. В этом случае для классификации объектов необходимо использовать статистику.

Пусть по каждому из M известных ИКО имеются результаты измерений

$$\vec{I}_{ij}^* = \vec{I}_{ij}^*(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}). \quad (14)$$

Эффективность классификации ИКО по регулярной составляющей силы излучения зависит от объема эталонных данных, относящихся к области функционального пространства $\{X\}$, в которой получены измерения по классифицируемому ИКО. Область пространства $\{X\}$, которая является общей для классифицируемого и k -го эталонного ИКО, обозначим $\{X\}_{\Delta k}$, при $k = \overline{1, M}$.

При проведении измерений с одного НОС эта область существенно зависит от разности долгот точек стояния эталонного и классифицируемого геостационарного ИКО. Увеличение объема измерительных данных путем увеличения дискретности измерений эту проблему полностью не решает. Одно из направлений решения данной проблемы состоит в использовании для построения ФМЭ измерений, проводимых с пространственно-разнесенных наземных НОС. При этом достигается не только увеличение области $\{X\}_{\Delta k}$, но и повышение качества ФМЭ, поскольку объединение результатов измерений с нескольких НОС позволяет получить более детальную информацию об ИКО в зависимости от ракурса его наблюдения.

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ПОРТРЕТА ИСКУССТВЕННОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

В качестве признаков классификации могут быть использованы оптико-геометрические характеристики ИКО, а также параметры ориентации и стабилизации, которые принципиально могут быть определены в результате обработки фотометрических измерений. Но ис-

пользование полученных наблюдений при различной ориентации объекта не всегда позволяет уверенно определить его тип, поскольку они не содержат информацию о спектральных характеристиках наблюдаемого объекта и их медленном изменении в результате деградации характеристик материалов покрытий конструктивных элементов под воздействием ФКП. Поэтому решение задачи классификации ИКО становится более определенным при включении в ФМП спектрофотометрических измерений.

При проведении сеансов измерений по геостационарным ИКО с одного НОС условия их наблюдения в течение сеанса изменяются лишь в результате изменения двух углов. Например, результаты измерений могут быть представлены в базисе «фазовый угол Θ – склонение Солнца δ ». По этой причине совокупность значений данных углов будем обозначать, как и выше, в общем виде двухкомпонентным векторным аргументом. Поэтому при построении спектрофотометрического портрета (СФМП) представим силу излучения ИКО в виде вектора $I(X)$

$$I(X) = I(\Theta, \delta, I'_{\text{ИКО}}), \quad (15)$$

аргумент которого зависит от величины фазового угла Θ (положение ИКО относительно Солнца и НОС), склонения Солнца δ (угол погружения верхнего края Солнца за горизонт) и редуцированной силы излучения $I'_{\text{ИКО}}$:

$$I'_{\text{ИКО}} = \Phi'_{\text{СТ}} \cdot 10^{0,4(m_{\text{СТ}} - m_{\text{ИКО}})} \cdot L^2 / S, \quad (16)$$

где $\Phi'_{\text{СТ}}$ – редуцированная величина спектральной плотности потока излучения звезды-стандарта;

$m_{\text{СТ}}$ – звездная величина звезды-стандарта;

$m_{\text{ИКО}}$ – звездная величина наблюдаемого ИКО;

L – наклонная дальность до объекта наблюдения;

S – площадь входного зрачка телескопа НОС.

В формуле (16) редуцированная величина спектральной плотности потока излучения звезды-стандарта определяется выражением

$$\Phi'_{\text{СТ}} = S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{СТ}}(\lambda) T(\lambda) d\lambda, \text{ при } T(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot \varphi(\lambda) \cdot [P_0(\lambda)]^{M(z)}. \quad (17)$$

Здесь $[P_0(\lambda)]^{M(z)}$ – кривая спектрального пропускания земной атмосферы [6];

$P_0(\lambda)$ – пропускание атмосферы в зените места наблюдений;

$M(z)$ – воздушная масса;

$\varepsilon(\lambda)$ – кривая спектральной чувствительности фотоприемника;

$o(\lambda)$ – кривая спектрального пропускания оптических элементов телескопа НОС;

$\varphi(\lambda)$ – кривая спектрального пропускания дополнительных светофильтров.

С учетом выражений (16) и (17) определяем, что редуцированная сила света, регистрируемая НОС от наблюдаемого объекта [7], определяется выражением

$$\begin{aligned} I' &= \Phi'_{\text{СТ}} \cdot 10^{0,4(m_{\text{СТ}} - m_{\text{ИКО}})} \cdot L^2 / S = L^2 \cdot 10^{0,4(m_{\text{СТ}} - m_{\text{ИКО}})} \cdot S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{СТ}}(\lambda) T(\lambda) d\lambda / S = \\ &= L^2 \cdot 10^{0,4(m_{\text{СТ}} - m_{\text{ИКО}})} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{СТ}}(\lambda) (\varepsilon(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot \varphi(\lambda) \cdot [P_0(\lambda)]^{M(z)}) d\lambda. \end{aligned} \quad (18)$$

В результате, аналитическое выражение, позволяющее вычислить количество отсчетов интенсивности излучения (редуцированной силы излучения), участвующих в формировании СФМП, имеет вид

$$I'_{\text{ИКО}} = L^2 \cdot 10^{0,4(m_{\text{ст}} - m_{\nu})} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{ст}}(\lambda) T(\lambda) d\lambda, \quad (19)$$

где $E_{\text{ст}}(\lambda)$ – СПЭО выбранной звезды-стандарта;
 λ_1, λ_2 – выбранный диапазон длин волн;
 $T(\lambda)$ – функция спектральной чувствительности фотоприемника излучения;
 $m_{\text{ст}}$ – блеск звезды-стандарта в выбранной спектральной полосе;
 m_{ν} – блеск наблюдаемого объекта в выбранной спектральной полосе;
 ν – фотометрическая полоса спектра, в которой регистрируется блеск.

Вектор $I(X)$ формирует в фазовом пространстве кластер, с некоторой вероятностью характеризующий наблюдаемый ИКО. Величина вектора зависит от отражательной способности покрытия объекта, а форма кластера – от его цветовых характеристик и пространственной ориентации. При подключении других параметров, например показателей цвета, размерность фотометрического портрета ИКО увеличивается. Отличие спектрального состава, принимаемого НОС излучения от солнечного, подтверждает необходимость рассмотрения спектральных характеристик объекта в динамике. Получаемый спектр от ИКО является надежным признаком для определения типов материалов покрытий поверхности, вносящей основной вклад в рассеянное солнечное излучение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расширение ФМП наблюдаемого ИКО возможно за счет оценки его спектрофотометрических характеристик, получаемых НОС. Это позволяет определить его тип или оперативно получить дополнительную информацию о состоянии ИКО, которая может оказаться ключевой в случае возникновения аварийной ситуации на борту. При этом в качестве признаков классификации ИКО в видимом диапазоне длин волн используются величины отсчетов силы излучения. Эффективность классификации ИКО зависит от качества эталонных ФМП, ошибки определения которых зависят от погрешностей результатов измерений, в том числе и в различных спектральных диапазонах. Если наблюдаемый объект не будет соответствовать ни одному из ранее известных, то проводятся дополнительные спектральные наблюдения ИКО с целью создания нового эталона.

Таким образом, фотометрический портрет ИКО может быть сформирован не только на языке оптико-геометрических или их динамических характеристик, но и непосредственно в терминах параметров принимаемых от объектов оптических сигналов. Наиболее часто используется геометрическая интерпретация классификации, в которой n признаков сигнала образуют в фазовом (n -мерном) пространстве кластеры, характеризующие отдельные объекты наблюдения. Отнесение этих точек или кластеров к тому или иному объекту (классу объектов) осуществляется с помощью дискриминантных функций. При таком подходе классификация наблюдаемого объекта является более простой и удобной в реализации. Данный подход не связан с необходимостью решения некорректных задач, и поэтому методы классификации ИКО могут быть реализованы в автоматизированном режиме работы НОС, что важно при решении различных задач мониторинга околоземного космического пространства.

Список используемых источников

1. Системы ракетно-космической обороны. Основы построения систем и средств ракетно-космической обороны : в 4 т. / О. Ю. Аксенов [и др.]; под ред. О. Ю. Аксенова. – М. : ИД «Аргументы недели», 2020. – Т. 3. – 240 с.

2. *Миронов В. В., Муртазов А. К., Усовик И. В.* Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. – Рязань : изд-во «ИП Коняхин А. В.», 2018. – 313 с.
3. *Благодыренко Е. В., Коробченко И. П., Мальцев Г. Н.* Ограничения наблюдения космических объектов наземными оптико-электронными системами в ночное время и в сумерки // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2021. – Вып. 680. – С. 71–76.
4. *Курьшев В. И., Муртазов А. К.* Физическое моделирование фотометрических характеристик ИСЗ // Наблюдения искусственных небесных тел. – 1987. – Вып. 83. – С. 39–44.
5. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей : учеб. для вузов. – 10-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2006. – 575 с.
6. Учет влияния атмосферной воздушной массы при спектрофотометрических наблюдениях искусственных спутников Земли / С. В. Логунов [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. – СПб. : НИИТ, 2021. – Вып. 2. – С. 48–56.
7. *Миронов А. В.* Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и спектрофотометрии звезд. – М. : Физматлит, 2008. – 260 с.

Д. М. Сафиулов

Военная академия связи имени С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ СВЯЗИ УЗЛА СВЯЗИ ПУНКТА УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАТИВНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

В статье описана методика формирования алгоритмической структуры системы мониторинга технического состояния техники связи узла связи пункта управления оперативного объединения. Алгоритмическая структура является одной из ключевых составляющих архитектуры системы мониторинга. Представлены этапы формирования алгоритмической структуры, включая выбор и распределение задач между объектами и серверами мониторинга, а также подбор протоколов управления и программного обеспечения. Приведены критерии и методы оптимизации, позволяющие создавать рациональную структуру, которая минимизирует ресурсопотребление и повышает устойчивость системы к внешним воздействиям при выполнении задач мониторинга и управления.

Ключевые слова: алгоритмическая структура архитектура, протокольные группы, рациональная структура, система мониторинга, системный подход, узел связи, функциональные ограничения.

ВВЕДЕНИЕ

Узел связи пункта управления оперативного объединения (УС ПУ) является основным элементом системы военной связи и одновременно важнейшим компонентом самого пункта управления. От правильного развертывания и функционирования УС ПУ зависит способность командования эффективно управлять войсками и координировать действия в динамике современных операций.

В ходе ведения операций функционирование УС ПУ происходит в сложной среде, на которую оказывают влияние различные внешние факторы, включая огневое поражение противника, радиоэлектронное подавление и другие виды помех. Эти воздействия могут существенно нарушить работу УС ПУ и, как следствие, управление войсками и оружием, что делает критически важным наличие эффективной автоматизированной системы мониторинга технического состояния всех его ключевых элементов. Такая система мониторинга позволяет своевременно выявлять и устранять неисправности, поддерживать высокий уровень готовности средств связи, обеспечивать защиту информации и минимизировать риски, связанные с нарушением работы системы связи объединения.

Процесс развертывания и эксплуатации УС ПУ требует строгого соблюдения принципов построения, основанных на теории сложных систем и принципах военной связи. Эти принципы включают в себя правила формирования структуры УС ПУ, обеспечения их устойчивости и адаптации к меняющимся условиям боевых действий. УС ПУ должен быть спроектирован так, чтобы он мог эффективно функционировать даже в условиях интенсивных внешних воздействий, включая воздействие противника и физико-географические особенности местности.

Ключевой задачей является создание системы мониторинга, которая обеспечивает полное и оперативное информирование должностных лиц органов управления связью о состоянии всех критически важных элементов УС ПУ практически в реальном времени. Система мониторинга должна быть способна не только выявлять текущие неисправности, но и предсказывать возможные сбои и аномалии, что позволяет оперативно реагировать на изменения в работе узла связи и поддерживать его функционирование на высоком уровне.

Эффективная система мониторинга, интегрированная в архитектуру узла связи, позволяет решать задачи по обеспечению связи в установленные сроки и с требуемым качеством, поддерживать внутреннюю связь на пункте управления, обеспечивать безопасность и защиту

передаваемой информации. При этом система мониторинга должна учитывать все особенности боевой обстановки, возможные действия противника и условия эксплуатации, что требует применения современных технологий и методов управления [1].

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УЗЛА СВЯЗИ ПУНКТА УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАТИВНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

Система мониторинга технического состояния техники связи на узле связи пункта управления оперативного объединения (СМ УС), создаваемая для целей информационного обеспечения должностных лиц органов управления связью, должна предоставлять полную и оперативную информацию о состоянии всех элементов УС ПУ практически в реальном масштабе времени [1].

Исследование таких технологически насыщенных систем, к которым относится СМ УС, требует поэтапного подхода, описанного в ряде исследований [2–5]. Формирование архитектуры СМ УС основано на системном подходе и является развитием этих этапов, с применением методологии анализа сложных систем.

Архитектура СМ УС

$$G = \{S_a, S_{ин}, S_{ма}, S_t\} \quad (1)$$

представляет собой упорядоченный набор структур: алгоритмической структуры (АС) S_a , информационно-поточковой структуры (ИПС) $S_{ин}$, маршрутно-адресной структуры (МАС) $S_{ма}$ и топологической структуры (ТС) S_t (рис. 1). Эта архитектура, абстрагируясь от конкретной физической реализации элементов УС ПУ, охватывает ключевые логические компоненты СМ УС и выполняемые ими функции [2].



Рис. 1. Состав и управляемые параметры архитектуры СМ УС

В работе [2] представлена обобщенная методика формирования архитектуры системы технологического управления сетью доступа. Мониторинг состояния управляемых объектов является неотъемлемой частью процесса управления и выступает как средство информационно-аналитической поддержки управления. Это обуславливает необходимость детализиро-

вать механизмы построения алгоритмической составляющей системы мониторинга для обеспечения ее оптимального функционирования в составе общей системы технологического управления. В рамках настоящего исследования предложена методика разработки одной из ключевых составляющих архитектуры СМ УС – алгоритмической структуры.

Управление информационными процессами на УС ПУ направлено на поддержание такой его организационно-технической структуры, которая обеспечивает доступ заданному множеству абонентов к ресурсам услуг связи с определенной пропускной способностью линий связи, производительностью телекоммуникационного оборудования (ТКО) по определенным правилам (протоколам) управления.

Алгоритмическая структура S_a СМ УС представляет собой совокупность характеристик алгоритмов, разделенных между элементами A – объектами мониторинга (ОМ) и B – серверами мониторинга (СрвМ) в рамках СМ УС, которые относятся к УС ПУ, т. е. $\{A, B\} \in S_{\text{ус пу}}$, и предназначены для выполнения заданных функций F СМ УС. В качестве управляемых параметров АС будут использоваться параметры (виды) протоколов управления $\Pi_{y,p}$ и необходимого программного обеспечения $\mathfrak{R}_{y,p}$, а также их распределение между ОМ $A_p \subseteq A$ и СрвМ $B_p \subseteq B$ в рамках так называемых протокольных групп $\Gamma_p = \{A_p, B_p\}$ [2].

Следует отметить, что на этапе формирования АС в протокольные группы в явном виде включаются только ОМ $A_p \subseteq A$, а СрвМ $B_p \subseteq B \cap A_p$ подразумеваются принадлежащими этим же группам в пределах пересечения множеств $B \cap A_p$. Конкретное соответствие СрвМ разных протокольных групп B_p сетевым элементам, на которых они располагаются, будет определено на этапе формирования топологической структуры СМ УС.

Рационально построенная СМ УС должна иметь иерархическую структуру, причем элементы системы одного уровня иерархии можно разбить на группы, в которых они идентичны. Это позволяет рассматривать работу лишь одного (типового) элемента – автоматизированного рабочего места (АРМ) из совокупности СрвМ – B одного уровня [4]. Под рационально построенной системой мониторинга понимается система, в которой задачи мониторинга и управления распределяются между элементами таким образом, чтобы минимизировать потребление ресурсов и обеспечить необходимый уровень эффективности ее функционирования, а также устойчивости к внешним воздействиям.

Множество известных протоколов управления СМ УС и ее элементами обозначим Π_y . К ним можно отнести простой протокол управления сетью SNMP (*Simple Network Management Protocol*) версий 1, 2 и 3 (v1, v2 и v3c) [6, 7], получивший большое распространение как протокол управления для средств телекоммуникаций и активных элементов вычислительных сетей. Широкое применение в настоящее время получил также протокол сетевого управления на основе расширяемого языка разметки XMLNMP (*eXtensible Markup Language*) [6, 7].

В качестве рационального решения для управления телекоммуникационным оборудованием может быть выбран протокол SNMP v3, который обеспечивает базовые функции мониторинга и управления в IP-сетях и поддерживает улучшенные механизмы безопасности, что делает его подходящим для условий применения в системе управления войсками и оружием. Однако, как показано в работах [1, 7], стандартные возможности SNMP v3 ограничены в плане прогнозирования состояния и адаптивного управления ресурсами. В связи с этим протокол требует доработки для обеспечения полноценного управления ресурсами, такими как каналные, энергетические, временные и вычислительные ресурсы, что особенно важно для функционирования УС ПУ в условиях ведения операции и ограниченных ресурсов. В работе [1] указаны подходы к реализации непрерывного диагностирования и предиктивной аналитики, которые могли бы интегрироваться в СМ УС для повышения ее эффективности и надежности, а в [7] подчеркнута необходимость добавления модулей обработки статистической информации для улучшения прогнозирования состояния сети.

Каждому набору Π_y соответствует множество выполняемых с их помощью функций (задач) СМ УС $F(\Pi_y)$, из которого необходимо выбрать подмножество $f \subseteq F(\Pi_y)$, необходимое и достаточное для реализации функций СМ УС [4].

Будем считать, что в СМ УС множество функций $F(\Pi_y)$ имеет однозначное отображение на множество процессов управления состоянием ТКО УС ПУ, которое обозначим $\Psi(\Pi_y)$. В дальнейшем ограничимся рассмотрением только этого множества. Протокольные группы ОМ, определяющие множество процессов управления $\Psi(\Pi_y)$ на множестве ОМ A обозначим как Γ_p . По существу Γ_p имеет смысл распределения определенным образом множества процессов управления $\Psi(\Pi_y)$ на множестве элементов УС ПУ по определенному алгоритму (правилу) E . Оптимальное отображение данного процесса должно обеспечить экстремум некоторой целевой функции при выполнении заданных ограничений [2]. Под оптимальным отображением процесса в работе понимается такое распределение задач между элементами СМ УС, которое обеспечивает наилучший результат по целевой функции (например, минимизацию времени выполнения или снижение нагрузки на телекоммуникационное оборудование).

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ СВЯЗИ УЗЛА СВЯЗИ ПУНКТА УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАТИВНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

Оптимизация алгоритмической структуры СМ УС может достигаться путем определения ее рационального варианта из множества допустимых. Рациональная АС должна представлять собой структуру, в которой задачи мониторинга и управления распределены по элементам системы с учетом их специфики и условий эксплуатации, что позволяет достигать экстремальных значений целевой функции при соблюдении всех заданных ограничений. В общем случае, задача нахождения рациональной АС СМ УС S'_a (пока без учета используемого программного обеспечения) состоит в распределении элементов УС ПУ A по протокольным группам (ПГ) ОМ Γ_p . При этом с учетом принятых обозначений данную задачу можно представить следующими выражениями:

$$S'_a = \{[f \subseteq \Psi(\Pi_y)] \ E \ [A_p \in \Gamma'_p]\}; \quad (2)$$

$$f \subseteq \Psi(\Pi_y); \quad (3)$$

$$A_p \subseteq A; \quad (4)$$

$$K(\Gamma_p) \geq 2. \quad (5)$$

Выражения (2)–(5) получены на основе требований к рациональному распределению задач мониторинга и управления между элементами УС ПУ. Они отражают необходимость выбора подмножества задач, распределенных по протокольным группам, которые соответствуют функциональным и ресурсным ограничениям системы. Выражение (2) задает множество задач управления, которое необходимо распределить по протокольным группам. Выражение (3) определяет, что задачи должны быть выбраны из множества допустимых функций, обеспечивающих соответствие требованиям протоколов управления. Выражение (4) указывает, что подмножество ОМ принадлежит множеству всех элементов УС ПУ. Это подразумевает, что каждый элемент УС ПУ распределяется по одной или нескольким протокольным группам. Выражение (5) устанавливает, что для обеспечения функциональности системы требуется минимум две протокольные группы, что позволяет гибко распределять элементы по группам для эффективного управления и оптимального использования ресурсов.

Эти условия формализуют задачу нахождения рациональной алгоритмической структуры, обеспечивая баланс между производительностью, устойчивостью и ресурсопотреблением системы.

В некоторых случаях для нахождения рациональной АС СМ УС S'_a достаточно использовать не все три выражения (2)–(4), а только их часть:

1) если протоколы управления УС ПУ заданы, то задача нахождения рациональной АС состоит в определении (2) и (3);

2) если заданы протоколы управления УС ПУ и выполняемые в ней процессы управления, то задача нахождения рациональной АС состоит в определении (2) и (4);

3) если заданы протоколы управления УС ПУ, выполняемые в ней процессы управления и элементы УС ПУ, то задача нахождения рациональной АС состоит в определении (2), т. е. рационального отображения множества взаимосвязанных процессов управления на множество элементов УС ПУ;

4) если задано множество процессов управления, выполняемых в СМ УС, множество элементов УС ПУ и комплекс технических средств (КТС) управления, то задача нахождения рациональной АС состоит в определении (2) и (3);

5) если ОМ протокольной группы поддерживают два и более протокола управления, то производится распределение ОМ по типу используемого специального программного обеспечения (СПО), иначе производится распределение ОМ по критерию минимального использования ресурса СПО и задача нахождения рациональной АС состоит в определении (5).

Выделим из множества процессов управления УС ПУ $\Psi(\Pi_y)$ подмножество процессов мониторинга и управления состоянием телекоммуникационного оборудования (ПМУ ТКО) по определенному типу используемого СПО $\mathfrak{R}_y \subseteq \Psi(\Pi_y)$, а из множества ОМ УС ПУ A – ПГ ОМ $A_p \in \Gamma_p$. Необходимо найти рациональное отображение множества ПМУ ТКО $\Psi(\Pi_y)$ в ПГ ОМ Γ_p , с учетом множества допустимых для каждой из задач принципов реализации и алгоритмов решения:

$$S''_a = \{[\mathfrak{R}_y \subseteq \Psi(\Pi_y)] \underline{E} [A_p \in \Gamma_p]\}. \quad (6)$$

Таким образом, итогом нахождения рациональной АС СМ УС S^*_a (и соответствующих протокольных групп Γ_p) является суперпозиция двух структур S'_a (2) и S''_a (6):

$$S^*_a = \{S'_a, S''_a\} = \{ \Gamma_p, \Pi_{y,p}, \mathfrak{R}_{y,p} \}_{K_p}, \quad (7)$$

где K_p – количество протокольных групп.

Каждая задача (2) и (6) предполагает наличие одного или нескольких вариантов рационального решения. Выбор того или иного варианта производится на основании заданного критерия. В частности, постановка задачи и нахождение рациональной АС комплекса ПМУ ТКО подразумевает выполнение основных этапов, к которым относятся:

1) выбор критерия, по которому будут оцениваться варианты АС СМ УС;

2) определение целевой функции, соответствующей выбранному критерию и заданным ограничениям;

3) выбор способа решения оптимизационной задачи;

4) определение перечня задач, возлагаемых на элементы СМ УС;

5) выбор ПГ ОМ и закрепление их за конкретными задачами (распределение задач по элементам СМ УС);

6) определение рационального алгоритма решения каждой задачи мониторинга и управления;

7) решение оптимизационной задачи на множестве рациональных вариантов распределения.

Выбор критерия во многом определяет эффективность нахождения рациональной АС СМ УС. Поэтому необходимо задаться требованиями, которым должен соответствовать критерий. Критерий должен отражать: общие требования, предъявляемые к мониторингу и управлению элементами УС ПУ; целевое назначение комплекса ПМУ ТКО. Критерий должен быть чувствительным к варьируемым параметрам модели (к размещению задач по элементам СМ УС и их количеству, к принципам реализации и к алгоритмам решения).

Кроме того, к целевой функции и ограничениям предъявляются требования по линейности и непрерывности [3]. Немаловажным критерием оценки вариантов АС СМ УС является ресурсопотребление СПО R . Адекватная оценка по чувствительности данного параметра к изменению параметров СМ УС может быть получена, если ограничиться учетом показателей ресурсопотребления специального программного $r_{\text{ПО}}$ и аппаратного обеспечения $r_{\text{ЭВМ}}$, находящегося на элементах УС ПУ и непосредственно задействованного в решении ПМУ ТКО. Такой подход вполне обоснован, поскольку КТС УС ПУ базируется на аппаратно-программной реализации.

Таким образом, обобщенный показатель приведенного ресурсопотребления СМ УС будет иметь вид

$$R = f[r_{\text{ПО}}, r_{\text{ЭВМ}}]. \quad (8)$$

Ресурсы аппаратного и программного обеспечения являются комплексными величинами и, в свою очередь, зависят от ряда факторов. Например, $r_{\text{ПО}}$ определяется сложностью алгоритмов и решаемых задач, которые предъявляют требования к производительности процессоров, объемам оперативной памяти, дисковой памяти и к периферийным устройствам. Все это влияет на ресурс $r_{\text{ЭВМ}}$.

Очевидно, что по критерию ресурсопотребления должна быть найдена такая АС, которая бы имела наименьшее ресурсопотребление, однако нетрудно заметить, что это приведет к ухудшению основных показателей, как СМ УС, так и УС ПУ в целом. Поэтому необходимо задаться обобщенным критерием, который бы учитывал частные критерии:

$$K(\xi) = f[A(\xi), B(\xi), R(\xi)], \quad (9)$$

где ξ – вариант набора протоколов СМ УС;
 $K(\xi)$ – обобщенный критерий;
 $A(\xi), B(\xi), R(\xi)$ – частные критерии, учитывающие количество ОМ A , СрвМ B и расход ресурсов R ПО и ЭВМ.

В данном случае для поиска оптимального решения можно предложить подход, при котором требования по количеству ОМ и СрвМ УС ПУ выводятся в ограничения. Далее ищется такая АС СМ УС, при которой бы достигался минимум $R(\xi)$. В этом случае в качестве целевой функции будем использовать выражение

$$K(\xi) = \min R(\xi) / \{A(\xi) \in A^{\text{рац}}, B(\xi) \in B^{\text{рац}}\}. \quad (10)$$

Целевая функция $K(\xi) = \min R(\xi)$ представляет собой зависимость суммарного ресурсопотребления от распределения задач между элементами УС ПУ. Из-за нелинейного характера затрат ресурсов, в зависимости от количества задач и особенностей их распределения, целевая функция, вероятнее всего, является нелинейной и может содержать несколько локальных экстремумов. Для исследования этой функции на наличие экстремумов и для нахождения оптимального распределения задач в рамках данной структуры предлагается использовать методы нелинейного программирования. Если анализ покажет выпуклость функции, это позволит применять методы поиска глобального экстремума, такие как градиентный спуск. В противном случае целесообразно использовать эвристические методы, включая генетические алгоритмы или алгоритмы роя частиц, которые эффективно справляются с задачами, имеющими несколько локальных экстремумов.

Если требуется увеличить количество СрвМ, то в качестве целевой функции будет выступать временной параметр, а ресурсопотребление и количество ОМ проверяются на соответствие ограничениям.

Будем считать, что цикл ПМУ ТКО представляет собой цепочку последовательно решаемых задач. При этом должно учитываться время, затрачиваемое как на решение самой задачи, так и время, необходимое для сбора информации о состоянии ОМ и доведения результатов решения до исполнительных СрвМ или для решения последующих задач, использующих результаты решения предыдущих.

Для формализации задачи распределения протокольных групп ОМ по критерию максимального количества решаемых задач управления на УС ПУ можно использовать подход, предложенный в [4], в соответствии с которым введем переменную η_{jkn_i} , определяемую как

$$\eta_{jkn_i} = \begin{cases} \frac{1}{m}, & \text{если } j\text{-я задача решается } k\text{-м алгоритмом} \\ & \text{в } n\text{-м ОМ УС ПУ с помощью } i\text{-го СПО;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (11)$$

Поскольку из различных вариантов последовательности решения j -й задачи на ОМ УС ПУ должен быть выбран один, то

$$\mathfrak{R} = \arg \max_{\mathfrak{R} \in \pi} \sum_{j=1}^m \eta_{j.k.n.i}, \quad (12)$$

где m – число всех задач ПМУ ТКО, распределенных и решаемых на ОМ УС ПУ.

После решения определенной задачи на одном из ОМ осуществляется решение следующей задачи на ОМ, который управляется протоколом другого уровня. По этой причине введем переменную

$$\eta_{j.k.n.i}^{(j'+1)(k'+1)i'} = \begin{cases} \frac{1}{m}, & \text{если после решения части } j\text{-й задачи } (j') \text{ по } k\text{-му алгоритму} \\ & \text{предоставляется возможность перейти к решению } (j'+1) \text{ части} \\ & \text{задачи по } (k'+1) \text{ алгоритму в } n\text{-м ОМ УС ПУ с помощью } i'\text{-го СПО;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases} \quad (13)$$

В качестве целевой функции, в принципе, может быть выбран некоторый интегральный критерий, включающий значения перечисленных выше частных критериев, при решении задач или их частей по отдельным протоколам управления. Однако при оценке качества решения на каждом этапе теряется физический смысл, и при сохранении аддитивности целевой функции вряд ли обоснованно могут быть выбраны весовые коэффициенты.

В конечном счете выбор этих коэффициентов сводится к задаче компонентного анализа, для которой требуется весьма существенный объем статистических данных. Поэтому в качестве целевой функции выберем один из приведенных показателей ресурсопотребления и сформулируем задачу в общем виде следующим образом:

$$R_1 \left[\eta_{j.k.n.i}, \eta_{j.k.n.i}^{(j'+1)(k'+1)i'} \right] \rightarrow \min, \quad (14)$$

$$\mathfrak{R} = \arg \max_{\mathfrak{R} \in \pi} \sum_{j=1}^m \eta_{j.k.n.i}, = 1. \quad (15)$$

Для примера расчета рассмотрим задачу распределения функций (задач) между пятью объектами мониторинга УС ПУ с использованием протокола SNMP v3. Пусть каждая задача

требует различного объема ресурса $r_{по}$, и общий ресурс системы ограничен значением $R = 100$. Целевая функция $K(\xi) = \min R(\xi)$ определяется на основании распределения задач, которые влияют на загрузку каждого ОМ. В случае равномерного распределения задач по всем ОМ получаем ресурсопотребление $R = 95$, что соответствует минимальным затратам. Однако при увеличении нагрузки на один ОМ до 60% общего ресурса суммарное ресурсопотребление возрастает до $R = 110$, это показывает превышение доступных ресурсов и требует перераспределения задач.

Таким образом, оптимальное распределение задач позволяет снизить нагрузку на каждый ОМ до 20%, минимизируя ресурсопотребление и поддерживая общую эффективность СМ УС.

Если по правилам (14) и (15) составить многомерную матрицу и применить к ней правила, которые применяются при построении сети из матрицы тяготений, то нетрудно будет получить сетевую модель, которая в общем виде приведена на рис. 2.

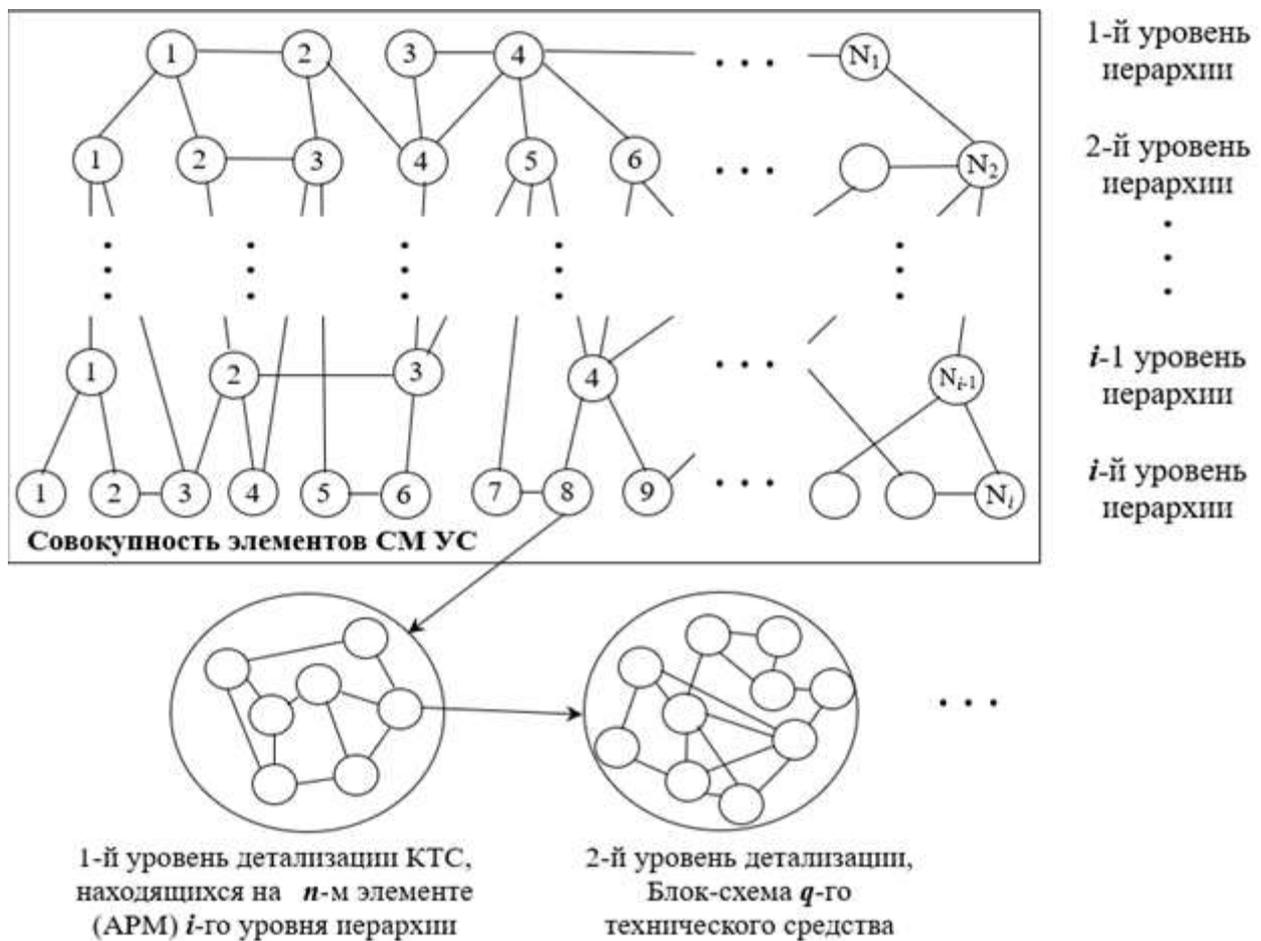


Рис. 2. Сетевая модель алгоритмической структуры решения задач мониторинга технического состояния техники связи УС ПУ

Смежными являются вершины только для соседних подмножеств. Элементы любого из подмножеств смежными не являются. На данной модели решение частных задач СМ УС будет представляться в виде пути. Данный путь включает: начальный и конечный элемент СМ УС – ОМ, в котором начинается и в котором заканчивается решение данной задачи; некоторые промежуточные элементы (задействованные промежуточные ОМ), а также ребра сети, обозначающие переход от одного ОМ к другому в соответствии с алгоритмом решения данной задачи.

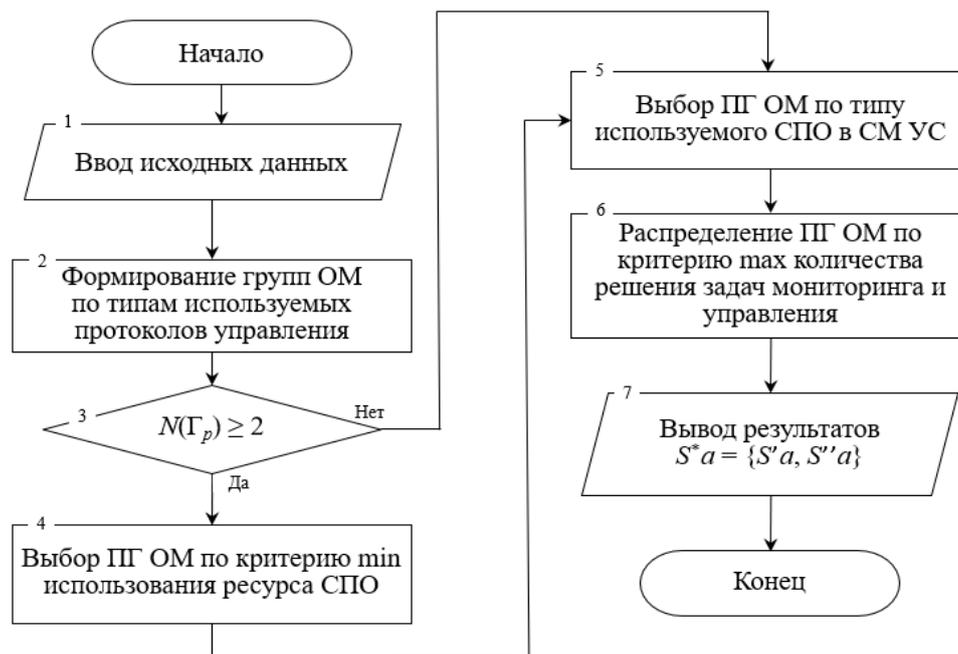


Рис. 3. Алгоритм формирования алгоритмической структуры системы мониторинга технического состояния техники связи УС ПУ

В целом предлагаемую методику формирования алгоритмической структуры СМ УС можно представить в виде алгоритма, приведенного на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика формирования алгоритмической структуры системы мониторинга технического состояния техники связи узла связи пункта управления оперативного объединения представляет собой последовательный и систематизированный подход, основанный на поэтапной декомпозиции задачи на взаимосвязанные этапы. Ключевым элементом методики является выбор и оптимизация алгоритмической структуры СМ УС, обеспечивающей достижение экстремума целевой функции при соблюдении ограничений, связанных с ресурсами, условиями эксплуатации и внешними воздействиями.

Методика охватывает основные аспекты формирования алгоритмической структуры СМ УС, включая распределение задач между объектами мониторинга и серверами, выбор протоколов управления и программного обеспечения. Подход, представленный в статье, позволяет значительно сократить количество возможных вариантов при разработке структуры, что способствует более эффективному решению задачи оптимизации.

Качество создаваемой СМ УС должно соответствовать требованиям, предъявляемым заказчиком, а именно должностными лицами органов управления связью оперативного объединения. Для них критически важно своевременное наличие необходимой информации о состоянии эксплуатируемого телекоммуникационного оборудования в технике связи, поскольку ее отсутствие может привести к срыву задач управления войсками, что недопустимо.

В дальнейшем важно продолжить углубленные исследования, направленные на формирование остальных трех структур СМ УС – информационно-поточковой, маршрутно-адресной и топологической, с учетом непрерывно обновляющихся технологий и постоянно ужесточающихся требований к управлению войсками в динамике ведения современных операций.

Список используемых источников

1. *Боговик А. В., Сафиулов Д. М.* Проблемы организации мониторинга телекоммуникационного оборудования узлов связи пунктов управления оперативного объединения и пути их решения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 196–198. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-5-196-197.
2. Методика формирования архитектуры системы технологического управления сетью доступа специального назначения / Д. А. Агафонов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 7. – С. 314–320.
3. *Боговик А. В., Сафиулов Д. М.* Модель оценки качества системы мониторинга технического состояния техники связи и автоматизированных систем управления телекоммуникационных сетей специального назначения // Техника средств связи. – 2022. – № 4(160). – С. 59–65. – DOI: 10.24412/2782-2141-2022-4-59-65.
4. *Боговик А. В., Сафиулов Д. М.* Методологический подход к формированию архитектуры системы мониторинга технического состояния техники связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 176–182. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-176-177.
5. *Боговик А. В., Сафиулов Д. М.* Модель управления процессом мониторинга технического состояния телекоммуникационных систем // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях : материалы VIII межвузовской науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 14 апреля 2023 г. – СПб. : Военная академия связи им. С. М. Буденного, 2023. – С. 66–71.
6. *Боговик А. В., Сафиулов Д. М.* Системный анализ реализации работы автоматизированной системы мониторинга технического состояния техники связи узлов связи пунктов управления оперативного объединения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 248–251. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-248-252.
7. *Боговик А. В., Сафиулов Д. М.* Анализ существующих систем мониторинга технического состояния телекоммуникационного оборудования сетей связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 112–117. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-112-113.

И. А. Готюр,
доктор технических наук, профессор;
А. А. Корицын,
кандидат технических наук;
А. В. Шевченко,
кандидат технических наук;
И. А. Яременко
кандидат технических наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА АЭРОЗОЛЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ЛАГРАНЖЕВОЙ ДИСКРЕТНОЙ ФАЗОВОЙ МОДЕЛИ

В статье рассмотрены факторы, влияющие на распространение аэрозолей в атмосфере. Представлена модель переноса аэрозоля в пограничном слое атмосферы с различными типами подстилающей поверхности на основе лагранжевой дискретной фазовой модели. Представлены результаты моделирования влияния типа подстилающей поверхности на седиментацию аэрозолей в турбулентной атмосфере для следующих типов подстилающей поверхности: водная гладь – городская застройка; водная гладь – поле; водная гладь – лес.

Ключевые слова: модель переноса аэрозоля, подстилающая поверхность, аэрозоли в атмосфере, пограничный слой атмосферы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время за рубежом и в России эксплуатируется дистанционная аппаратура оценки выбросов аэрозолей в атмосферу. Космические средства детектирования токсичных веществ в атмосфере позволяют выявлять только большие по площади аэрозольные облака ограниченного перечня веществ (в основном парниковые газы) и на расстоянии от Земли выше 1 км. Поэтому для дистанционного выявления локальных выбросов опасных газов в приземном слое атмосферы целесообразно использовать аппаратуру, размещенную на авиационных и наземных мобильных средствах. Данная аппаратура предоставляет наибольшую детальность и возможность выявления более расширенного перечня газов.

Дороговизна экспериментов по оценке параметров распространения аэрозолей в атмосфере создает предпосылки к созданию модели переноса аэрозоля в пограничном слое атмосферы с различными типами подстилающей поверхности. В настоящее время учет турбулентности пограничного слоя, а также типа подстилающей поверхности сводится к использованию эмпирических коэффициентов, что не позволяет детально учесть особенности локальной циркуляции воздуха на стыке и в условиях различных типов подстилающей поверхности: вода, лес, городская застройка, болотистая местность и т. д.

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ АЭРОЗОЛЕЙ В АТМОСФЕРЕ

Основными процессами, сопровождающими распространение атмосферных примесей, являются диффузия и физико-химическое взаимодействие примесей между собой и с компонентами атмосферы [1, 2].

Примеры физического реагирования – конденсация паров кислот во влажном воздухе с образованием аэрозоля, уменьшение размеров капель жидкости в результате испарения в сухом теплом воздухе. Жидкие и твердые частицы могут объединяться, растворять газообраз-

ные вещества, выпадать на подстилающую поверхность в результате сухого оседания (седиментации), оседать в результате коагуляции, обводнения, выпадения с осадками [3].

Некоторые процессы химических преобразований начинаются непосредственно с момента поступления выбросов в атмосферу, другие – при появлении для этого благоприятных условий: необходимых реагентов, солнечного излучения, других факторов [4].

Углеводороды в атмосфере подвергаются различным превращениям (окислению, полимеризации), взаимодействуя с другими загрязнителями прежде всего под действием солнечной радиации. В результате этих реакций образуются пероксиды, свободные радикалы, соединения с NO_x и SO_x .

Соединения серы поступают в атмосферу в виде SO_2 , SO_3 , H_2S , CS_2 . В свободной атмосфере SO_2 через некоторое время окисляется до SO_3 или вступает во взаимодействие с другими соединениями, в частности углеводородами, при фотохимических и каталитических реакциях. Конечным продуктом является аэрозоль или раствор серной кислоты в дождевой воде [5].

Уровень приземной концентрации вредных веществ в атмосфере от стационарных и подвижных объектов промышленности и транспорта при одном и том же массовом выбросе может существенно меняться в атмосфере в зависимости от техногенных и природно-климатических факторов [3].

Под техногенными факторами будем понимать интенсивность и объем выброса вредных веществ; высоту расположения устья источника выбросов от поверхности земли; размер территории, на которой осуществляются загрязнения; уровень техногенного освоения региона.

К природно-климатическим факторам распространения загрязняющих веществ обычно относят:

- 1) режим циркуляции атмосферы, ее термическую устойчивость;
- 2) атмосферное давление, влажность воздуха, температурный режим;
- 3) температурные инверсии, их повторяемость и продолжительность;
- 4) скорость ветра, повторяемость застоев воздуха и слабых ветров (от 0 до 1 м/с);
- 5) продолжительность туманов;
- 6) рельеф местности, геологическое строение и гидрогеологию района;
- 7) почвенно-растительные условия (тип почв, водопроницаемость, пористость, гранулометрический состав почв, состояние растительности, состав пород, возраст, бонитет);
- 8) фоновые значения показателей загрязнения природных компонентов атмосферы;
- 9) состояние животного мира.

В природной среде непрерывно меняются температура воздуха, скорость, сила и направление ветра. Поэтому распространение энергетических и ингредиентных загрязнений происходит в постоянно меняющихся условиях. Процессы разложения токсических веществ в высоких широтах при малых значениях солнечной радиации замедляются. Осадки и высокие температуры, наоборот, способствуют интенсивному разложению веществ. Более высокая температура у поверхности земли в дневное время заставляет воздух подниматься вверх, что приводит к дополнительной турбулентности. Ночью температура у поверхности земли более низкая, поэтому турбулентность уменьшается. Это явление приводит к уменьшению рассеивания отработавших газов [6].

Способность земной поверхности поглощать или излучать теплоту влияет на вертикальное распределение температуры в приземном слое атмосферы и приводит к температурной инверсии (отклонению от адиабатности). Повышение температуры воздуха с высотой приводит к тому, что вредные выбросы не могут подниматься выше определенного «потолка». В инверсионных условиях ослабляется турбулентный обмен, ухудшаются условия рассеивания вредных выбросов в приземном слое атмосферы [3]. Для приземной инверсии особое значение имеет повторяемость высот верхней границы, для приподнятой инверсии – повторяемость высот нижней границы.

Сочетание природных факторов, определяющих возможный уровень загрязнения атмосферы, характеризуется метеорологическим и климатическим потенциалом загрязнения атмосферы, а также высотой слоя перемешивания, повторяемостью приземных и приподнятых инверсий, их мощностью, интенсивностью, повторяемостью застоев воздуха, штилевых слоев [4].

Уменьшение концентраций вредных веществ в атмосфере происходит не только вследствие разбавления выбросов воздухом, но и из-за постепенного самоочищения атмосферы. Явление самоочищения сопровождается следующими основными процессами:

- седиментацией, т. е. выпадением выбросов с низкой реакционной способностью (твердых частиц, аэрозолей) под действием силы тяжести;
- нейтрализацией и связыванием газообразных выбросов в открытой атмосфере под действием солнечной радиации, химического взаимодействия, вымывания осадками и коагуляции.

Скорость седиментации (оседания под действием силы тяжести) пропорциональна приблизительно квадрату размера частиц и составляет несколько десятков сантиметров в секунду для частиц размером 100 мкм, несколько миллиметров в секунду для частиц в 10 мкм и чрезвычайно мала для частиц меньше 1 мкм.

Определенный потенциал самовосстановления свойств окружающей среды, в том числе и очищения атмосферы, связан с поглощением водными поверхностями до 50% природных и техногенных выбросов CO_2 . В водоемах растворяются и другие газообразные загрязнители воздуха. То же происходит на поверхности зеленых насаждений: 1 га городских зеленых насаждений поглощает в течение часа такое же количество CO_2 , которое выдыхают 200 человек.

Химические элементы и соединения, содержащиеся в атмосфере, поглощают часть соединений серы, азота, углерода. Гнилостные бактерии, содержащиеся в почве, разлагают органические остатки, возвращая CO_2 в атмосферу.

СИСТЕМА ТРЕХМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ

Расчеты движения аэрозоля в атмосфере сводятся в общем случае к численному решению системы трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидродинамики (уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу) с удовлетворяющей условиям задачи моделью турбулентности, которая замыкает системы уравнений. Уравнения для средних переменных следующие:

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

- где ρ – средняя плотность;
 \vec{u} – вектор средней скорости потока;

- уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla p + \nabla (\bar{\tau} + \tau^T), \quad (2)$$

- где p – среднее давление;
 $\bar{\tau}$ – тензор среднего напряжения;
 τ^T – тензор турбулентного напряжения;

- уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla (\vec{u} (\rho E + p)) = -\nabla ((\bar{\tau} + \tau^T) \vec{u}) + \nabla \vec{q}, \quad (3)$$

где E – средняя полная энергия,

$$E = e + u^2/2,$$

где u – скорость среднего потока, $u = \|\vec{u}\|$;

e – средняя внутренняя энергия;

\vec{q} – средний тепловой поток.

Тензоры напряжения представляются в следующем виде:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} (\nabla \vec{u}) I \right]; \quad (4)$$

$$\tau^T = \mu_T \left[(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) - \frac{2}{3} (\nabla \vec{u}) I \right] - \frac{2}{3} \rho k I.$$

Здесь $\nabla \vec{u}^T$ – градиент (направление) вектора скорости;

I – единичный тензор;

k – турбулентная кинетическая энергия;

μ_T – турбулентная вязкость,

$$\mu_T = k/\omega,$$

где ω – удельная скорость диссипации.

Молекулярная вязкость определяется законом Сазерленда:

$$\mu(T) = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{(T_0 + S)}{T + S}, \quad (5)$$

где μ_0 – исходная вязкость, $\mu_0 = 1,716 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с);

T_0 – исходная температура, $T_0 = 273,11$ К;

S – эффективная температура, $S = 110,56$ К.

Тепловой поток в формуле (3) определяется законом Фурье:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T, \quad (6)$$

где λ – теплопроводность газа.

Средняя внутренняя энергия e определяется термодинамическим соотношением:

$$de = C_v dT, \quad (7)$$

где C_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Тепловые уравнения состояния соответствуют уравнению идеального газа:

$$p = \rho \frac{Rg}{M} T, \quad (8)$$

где M – молекулярная масса газа.

Давление газовой смеси складывается из парциальных давлений всех компонентов:

$$p = \sum_{s=1}^{N_c} p_s = \sum_{s=1}^{N_c} \rho_s \frac{R}{M_s} T = \rho \frac{R}{M_\Sigma} T, \quad (9)$$

где T – температура;

R – универсальная газовая постоянная;

M_Σ – кажущаяся молекулярная масса газовой смеси,

$$M_\Sigma = \left(\sum_{s=1}^{N_c} \frac{c_s}{M_s} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Полная энергия состоит из внутренней и кинетической составляющих:

$$E = e + \frac{u^2}{2}. \quad (11)$$

Внутренняя энергия газовой смеси складывается из внутренних энергий отдельных компонентов e :

$$e = \sum_{s=1}^{N_c} C_s e_s. \quad (12)$$

Энтальпия определяется по формуле

$$h = e + \frac{p}{\rho} = \sum_{i=1}^{N_c} C_i e_i + \sum_{i=1}^{N_c} C_i \frac{R}{M_i} T = \sum_{i=1}^{N_c} C_i \left(e_i + \frac{R}{M_i} T \right) = \sum_{i=1}^{N_c} C_i h_i, \quad (13)$$

где энтальпия компонента s равна

$$h_s = e_s + \frac{R}{M_s} T. \quad (14)$$

Для h_s используются справочные термодинамические формулы в зависимости от температуры:

$$\begin{aligned} \frac{h_s(T)}{R_s T} &= a_{1,s} + a_{2,s} + a_{3,s} + a_{4,s} + a_{5,s} T^4 / 5 + \frac{b_{1,s}}{T}, \\ \frac{h_s(T)}{R_s T} &= a_{1,s} + a_{2,s} \frac{T}{2} + a_{3,s} \frac{T^2}{3} + a_{4,s} \frac{T^3}{4} + a_{5,s} \frac{T^4}{5} + \frac{b_{1,s}}{T}, \end{aligned} \quad (15)$$

где R_s – газовая постоянная компонента s , $R_s = R/M_s$.

МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕНТЕРА

Используемая в расчетах модель турбулентности Ментера (SST-модель) [7–9] является некой комбинированной моделью, основанной на использовании k - ω модели в пристеночных областях и k - ε модели в областях, находящихся на достаточном удалении от стенки. Этот комбинированный метод заключается в преобразовании уравнений k - ε модели к k - ω формулировке. Уравнения видоизмененной k - ε модели дополняются стыковочной функцией $1 - F_1$. Функция F_1 принимает значение $F_1 = 1$ вблизи поверхности и обращается в ноль за пределами пограничного слоя, т. е. на линии границы пограничного слоя и за его пределами k - ε модель возвращается к первоначальной, стандартной формулировке. Эта модель показала хорошие результаты при расчете течений в зоне отрыва и при сильном продольном градиенте давления, поскольку учитывает перенос касательных напряжений.

Основные уравнения модели:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho K) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j K) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{K3}} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + P_K - \beta_0^* \rho K \omega; \quad (16)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \omega) = \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha_3 \frac{\omega}{K} P_K - \beta_3 \rho \omega^2 + (1 - F_1) \frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial K}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (17)$$

где коэффициенты новой модели – это линейная комбинация соответствующих коэффициентов моделей, лежащих в основе метода:

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= F_1 \alpha + \alpha_2 (1 - F_1), \quad \beta_3 = F_1 \beta_0 + \beta_2 (1 - F_1), \\ \frac{1}{\sigma_{K3}} &= F_1 \frac{1}{\sigma_{K1}} + (1 - F_1) \frac{1}{\sigma_K}, \quad \frac{1}{\sigma_{\omega 3}} = F_1 \frac{1}{\sigma_{\omega 1}} + (1 - F_1) \frac{1}{\sigma_{\omega 2}} \end{aligned} \quad (18)$$

Стыковочная функция в модели Менстера строится таким образом, что наиболее адекватно учитывать перенос напряжения трения в пограничном слое.

Коэффициент турбулентной вязкости в модели Менстера определяется по формуле

$$\mu_T = \rho \frac{K}{\max(\omega, SF_2/a_1)} \quad (19)$$

где $a_1 = 0,31$, а S – инвариант тензора скоростей деформации, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$. При этом

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (20)$$

Стыковочные функции в SST-модели определяются по следующим формулам:

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4); \quad (21)$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{K}}{\beta_0^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho K}{CD_{K\omega} \sigma_{\omega 2} y^2} \right]; \quad (22)$$

$$CD_{K\omega} = \max \left(\frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial K}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 1.0 \times 10^{-10} \right); \quad (23)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^4); \quad (24)$$

$$\arg_2 = \max \left(\frac{\sqrt{K}}{\beta_0^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \quad (25)$$

где y – расстояние до ближайшей стенки.

Расстояние от стенки можно определять чисто геометрически, но лучше использовать следующий алгоритм.

Для всей расчетной области решается уравнение Пуассона

$$\nabla^2 \phi = -1 \quad (26)$$

с граничными условиями Дирихле $\phi = 0$ на стенке и Неймана $\frac{d\phi}{dn} = 0$ на всех остальных границах.

После нахождения функции ϕ расстояние от стенки определяется через градиент ϕ :

$$y = -|\nabla\phi| + \sqrt{|\nabla\phi|^2 + 2\phi}. \quad (27)$$

Моделирование частиц осуществлялось дополнением уравнений (1)–(27) лагранжевой дискретной фазовой моделью. Модель основана на подходе Эйлера – Лагранжа, т. е. жидкая фаза рассматривается как континуум путем решения уравнений Навье – Стокса, а дисперсная фаза решается путем отслеживания большого количества частиц (капли/частички) через рассчитанное поле потока. Дисперсная фаза может обмениваться импульсом, массой и энергией с жидкой фазой. Траектории капель рассчитываются индивидуально через определенные промежутки времени во время расчета жидкой фазы.

Расчет траектории движения лагранжевых частиц дискретной фазы (капли/частички) происходит путем интегрирования баланса сил на частице, который записывается в системе отсчета Лагранжа. Этот баланс сил уравнивает инерцию частицы с силами, действующими на частицу, и может быть записан как

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}, \quad (28)$$

где m_p – масса частицы;
 \vec{u} – скорость газовой фазы;
 \vec{u}_p – скорость частицы;
 ρ – плотность газа;
 ρ_p – плотность частицы;
 \vec{F} – добавочная сила.

В формуле (28) сила лобового сопротивления определяется как $m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$, где τ_r – время релаксации, которое рассчитывается следующим образом:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re}. \quad (29)$$

Здесь μ – молекулярная вязкость газа;
 d_p – диаметр частицы;
 Re – число Рейнольдса.

Вращение частиц (капли/частички) учитывается дифференциальным уравнением для углового момента частицы

$$l_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{d_p}{2}\right)^5 C_\omega |\vec{\Omega}| \vec{\Omega} = \vec{T}, \quad (30)$$

где l_p – момент инерции частицы;
 $\vec{\omega}_p$ – угловая скорость частицы;
 ρ_f – плотность газа;
 d_p – диаметр частицы;
 C_ω – коэффициент сопротивления вращению;
 \vec{T} – крутящий момент, приложенный к частице в газовой фазе;
 $\vec{\Omega}$ – относительная угловая скорость частицы (капли),

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{u}_f - \vec{\omega}_p. \quad (31)$$

Для сферических частиц момент инерции рассчитывается следующим образом:

$$l_p = \frac{\pi}{60} \rho_p d_p^5. \quad (32)$$

В баланс сил частицы включаются добавочные силы \vec{F} , которые могут быть важны при особых обстоятельствах. Первая из них – это сила «виртуальной массы», сила, необходимая для ускорения газа, окружающего частицу. Она может быть записана как

$$\vec{F} = C_{vm} m_p \frac{\rho}{\rho_p} \left(\vec{u}_p \nabla \vec{u} - \frac{d\vec{u}_p}{dt} \right), \quad (33)$$

где C_{vm} – коэффициент виртуальной массы.

Дополнительная сила возникает из-за градиента давления в газе:

$$\vec{F} = m_p \frac{\rho}{\rho_p} \vec{u} \nabla \vec{u}. \quad (34)$$

Мелкие частицы, взвешенные в газе с градиентом температуры, испытывают силу в направлении, противоположном градиенту. Это явление известно как термофорез. Термофоретическое воздействие на частицы вычисляется следующим образом:

$$\vec{F} = -D_{T,p} \frac{1}{T} \nabla T, \quad (35)$$

где $D_{T,p}$ – термофорический коэффициент [14, 15], рассчитываемый по формуле

$$D_{T,p} = \frac{6\pi d_p \mu^2 C_s (K + C_t Kn)}{\rho(1 + 3C_m Kn)(1 + 2K + 2C_t Kn)}. \quad (36)$$

Здесь Kn – число Кнудсена;
 T – локальная температура газа;
 μ – вязкость газа.

Подъемная сила частицы вычисляется согласно уравнению Саффмана [14, 15]:

$$\vec{F} = m_p \frac{2K v^{0.5} \rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ik} d_{kl})^{\frac{1}{4}}} (\vec{u} - \vec{u}_p). \quad (37)$$

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТИПА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТУРБУЛЕНТНУЮ ДИФФУЗИЮ И ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ АЭРОЗОЛЕЙ

Для проведения исследования было использовано компьютерное моделирование вычислительной газогидродинамики с применением программного комплекса для расчета турбулентной диффузии и жизненного цикла аэрозолей.

Моделирование будет проходить в несколько этапов. На каждом этапе будет изменяться пространственная сетка в области моделирования. Эта область будет иметь горизонтальные размеры около 50 км и занимать часть слоя между поверхностью Земли и сферой с центром в центре Земли, проходящей на высоте 1–2 км над самой высокой точкой поверхности Земли на нижней границе области моделирования. На границе области моделирования ветер, плотность, температура и давление воздуха будут заданы.

Внутри области моделирования выделяется подобласть, в которой будет пространственная сетка с более высоким разрешением, чем в остальной части области моделирования. В начальный момент в центре этой подобласти будет задано распределение аэрозольных частиц. При этом размеры подобласти не превышают утроенных размеров начального облака частиц. По мере разрастания облака аэрозольных частиц и приближения его границ к границам подобласти, будет проводиться увеличение размеров подобласти в два раза и огрубление шагов сетки в ней также в два раза. Такой прием позволит иметь хорошее пространственное разрешение при моделировании движения и эволюции облака аэрозольных частиц.

Влияние скорости ветра и подстилающей поверхности на поле концентрации будет учитываться в вычислении вертикальных профилей коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии в приземном слое атмосферы, для вычисления которых используются разные модели турбулентности.

Исследование влияния типа земной поверхности на турбулентную диффузию и жизненный цикл аэрозолей проведено для следующих вариантов типов земной поверхности: водная гладь – городская застройка; водная гладь – поле; водная гладь – лес.

Объемная геометрическая модель расчетного варианта выполняется согласно исходных данных (рис. 1). При создании трехмерной геометрической модели объекта детализация выбирается в соответствии с поставленной задачей, с учетом близлежащей территории радиусом, достаточным для учета аэродинамического влияния окружающего ландшафта (перепады высот вблизи целевого объекта) от 1 до 30 км.

Наиболее эффективным методом дискретизации континуальной задачи является метод конечных объемов [10–12], не требующий столь детального моделирования пограничного слоя, как метод конечных элементов, и существенно более универсальный при описании сложных расчетных областей реальных зданий и сооружений, чем метод конечных разностей.

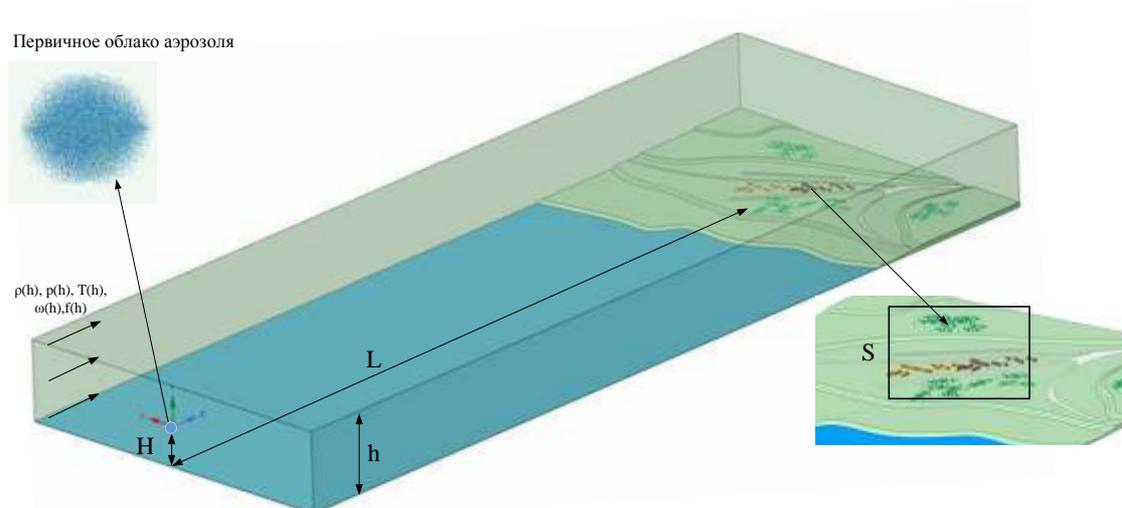


Рис. 1. Пример модели расчетной области

В объемной геометрической модели создается комбинированная конечно-объемная сетка: неструктурированная сетка из тетраэдров, призм и пирамид в геометрически «сложных» областях и структурированная сетка из гексаэдров в геометрически «простых» областях (рис. 2).

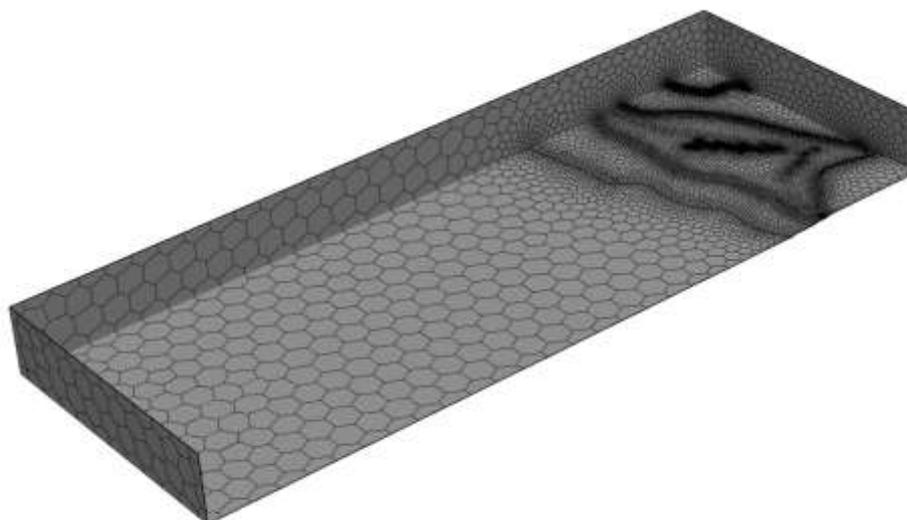


Рис. 2. Сетка конечных элементов расчетной области

Рекомендуемые размеры конечно-объемных сеток для проведения основных расчетных исследований:

- у поверхности целевого объекта и приземном воздушном слое (~4 м от земли) 0,25–1 м;
- в ближней зоне целевого объекта (в радиусе 0,3–0,5 км) у поверхностей объекта и приземном воздушном слое достигают 1,5–3 м;
- на достаточном удалении от целевого объекта размеры в приземном слое 4–6 м.

Для корректного учета аэродинамических процессов, в том числе турбулентной диффузии, происходящих в пограничном слое поверхностей целевого объекта, рекомендуется дискретизация пограничного слоя на его толщину, не менее пяти элементов. Параметры дискретизации пограничного слоя зависят от скорости потока ветра, размеров и формы целевого объекта.

Статистика сетки конечных элементов трехмерной модели представлена в табл. 1.

Таблица 1

Статистика сетки конечных элементов объекта исследования

Параметр	Значение
Количество ячеек	5116389
Количество узлов	1622365
Безразмерное расстояние от первого узла сетки до стенки y^+	$\leq 1,9$
Коэффициент роста	16
Показатель скошенности	16

Рекомендуется дискретизировать пограничный слой в нормальном к поверхностям направлении не менее, чем 10 объемами. Размер элементов в нормальном к поверхностям направлении (толщина) рекомендуется не менее 2 м. Размер элементов в других направлениях должен быть не больше, чем 20 толщин. При этом параметры пристеночного слоя должны удовлетворять величине y^+ выбранной модели турбулентности.

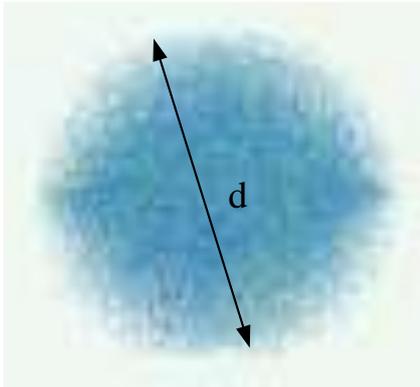


Рис. 3. Внешний вид малого точечного источника

В качестве начальной формы облака аэрозоля выбрана сфера (рис. 3).

Для описания распределения размеров частиц в начальной форме облака аэрозоля используется распределение Розина – Раммлера (функция распределения вероятностей). Минимальный диаметр частиц, прогнозируемый распределением Розина – Раммлера, ограничивается 10% указанного параметра, а максимальный диаметр частиц не ограничен.

Параметры аэрозоля представлены в табл. 2. Параметры образования аэрозоля представлены в табл. 3. Горизонтальная составляющая скорости частицы аэрозоля определяется скоростью ветра, а вертикальная – скоростью ее падения.

Таблица 2

Параметры аэрозоля в начальной форме облака

Параметр	Единица измерения	Значение
Начальный диаметр облака	м	5
Объем аэрозоля	л	30
Плотность частицы	г/см ³	1
Радиус частицы	мкм	10
Распределение по диаметрам частиц D10/D50/D90	мкм	6/9,8/13,2
Форма частицы		Сферическая
Вязкость частицы	Па×с	$8,9 \times 10^{-4}$

Таблица 3

Параметры образования аэрозоля

Параметры образования		Метеоусловия				
H , км	L , км	ρ , кг/м ³	p , кПа	T , К	ω , м/с	f , %
0,4	11	1,12	101,3	280	2	80

В качестве начальных условий во всей расчетной области, исключая границу «входа», используются нулевые скорости ($\omega = 0$ м/с), нулевые дополнительные давления и характеристики турбулентности, соответствующие потоку на «входе». Давление в расчетной области $p_a = 105$ Па. Граничные и начальные условия представлены на рис. 1.

Физическое время счета должно быть достаточным, чтобы средняя составляющая и дисперсия давлений на поверхностях целевого объекта не изменялись при его дальнейшем увеличении.

Применяются схема адвекции высокого разрешения и неявная схема интегрирования по времени второго порядка.

Критерием сходимости и окончания счета является достижение заданного уровня максимальных невязок от 10^{-4} до 10^{-5} и асимптотическое поведение зависимостей аэродинамических сил от номера шага (условного времени).

Результаты исследования влияния типа земной поверхности (поле, лес, водная гладь, городская застройка) на турбулентную диффузию и жизненный цикл аэрозолей представлены на рис. 4–6.

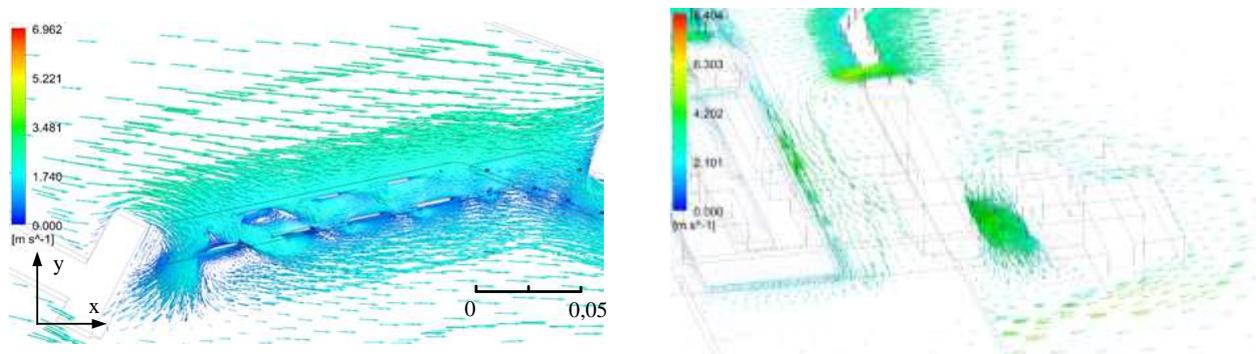


Рис. 4. Примеры векторов скорости аэрозоля вблизи городской застройки при скорости ветра 2 м/с

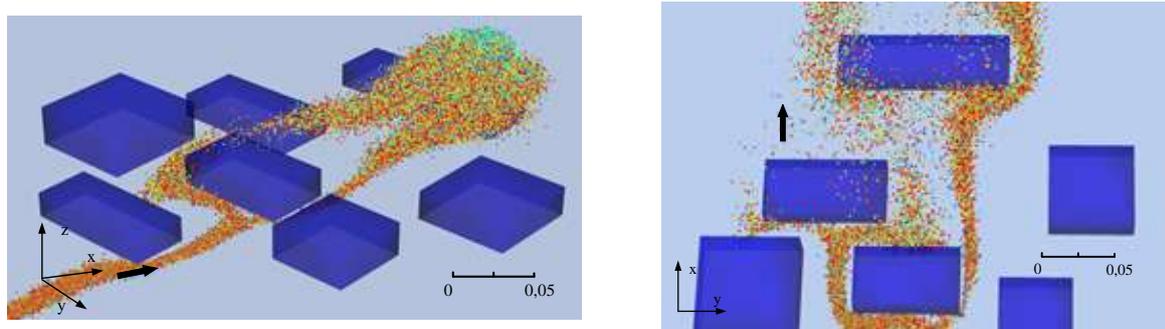


Рис. 5. Эволюция и движение аэрозоля через городскую застройку

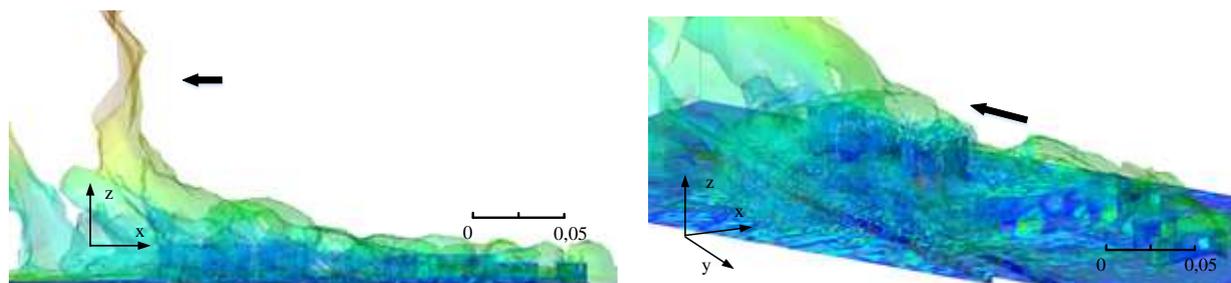


Рис. 6. Примеры локальных вихрей вблизи застройки

Лесозащитная полоса представляется набором деревьев равной высоты, с конической формой кроны, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга с различными вариантами посадки деревьев. Частицы верхнего облака, находясь в восходящем потоке воздуха, поднимаются над деревьями и движутся над ними, частично оседая на кроны деревьев. При этом большая часть крупных частиц (10 мкм) поднимается недостаточно высоко и либо оседает на кронах деревьев, либо теряет скорость в пористой среде и оседает уже на землю под действием силы тяжести. Мелкие частицы (4 мкм) в большом количестве преодолевают расстояние над кронами деревьев и оседают уже после лесозащитной полосы (рис. 7).

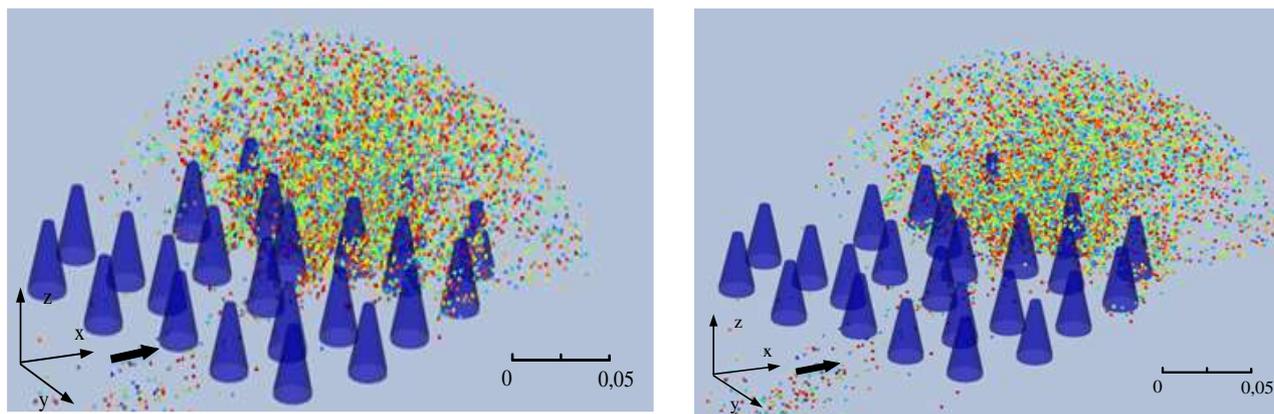


Рис. 7. Эволюция и движение аэрозоля через лесной массив

В это же время частицы нижней части облака, движущиеся в узком пространстве под кронами деревьев, распространяются на значительное расстояние. Так мелкие частицы нижнего облака пролетают область лесополосы быстрее, чем такие же частицы верхнего облака. По пути происходит оседание частиц, но в силу их небольшой массы они оседают в меньшей степени, нежели частицы более крупных размеров.

Частицы нижнего пылевого облака размером 0,5 мкм пролетают меньшее расстояние под кронами деревьев и оседают практически полностью в области лесополосы, почти не достигая ее последнего дерева.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены факторы, влияющие на распространение аэрозолей в атмосфере.

Представлена модель переноса аэрозоля в пограничном слое атмосферы с различными типами подстилающей поверхности на основе лагранжевой дискретной фазовой модели. Расчет траектории движения лагранжевых частиц дискретной фазы происходит путем интегрирования баланса сил на частице, который записывается в системе отсчета Лагранжа.

Представлены результаты моделирования влияния типа подстилающей поверхности на турбулентность аэрозолей в атмосфере в пограничном слое для следующих типов подстилающей поверхности: водная гладь – городская застройка; водная гладь – поле; водная гладь – лес.

Городская застройка создает условия для образования локальных вихрей, которые ускоряют перемещение воздушных масс и аэрозолей. Это может привести к более интенсивному перемещению аэрозолей и их быстрому удалению из городской среды.

Лес создает условия для замедления воздушных потоков, что может привести к накоплению аэрозолей в лесной зоне. Однако это также может способствовать осаждению аэрозолей на растения и их последующему удалению из атмосферы.

Список используемых источников

1. *Базаров И. П.* Термодинамика. – М. : Высш. шк., 1991. – 375 с.
2. *Базаров И. П., Геворкян Э. В., Николаев П. Н.* Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем. – М. : Изд-во МГУ, 1986. – 309 с.
3. *Жермен П.* Механика сплошных сред. – М. : Мир, 1965. – 479 с.
4. *Ионисян А. С.* О целесообразности использования метода Зейделя при численном решении уравнения диффузии примеси в атмосфере // Проблемы физико-математических наук : материалы 48-й научно-методич. конф. преподавателей и студентов «Университетская наука – региону». – Ставрополь : Изд-во СГУ, 2003. – С. 76–78.
5. Новое в экологии и БЖД : сб. докладов конгресса. – СПб., 2000. – Т. 2. – 305 с.
6. *Берлянд М. Е.* Предсказание и регулирование теплового режима приземного слоя атмосферы. – Л. : Гидрометеиздат, 1956. – 436 с.
7. *Белостоцкий А. М., Акимов П. А., Афанасьева И. Н.* Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. – М. : АСВ, 2017. – 720 с.
8. *Волков К. Н., Емельянов В. Н.* Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа. – М. : Физматлит, 2012. – 468 с.
9. *Белостоцкий А. М., Дубинский С. И., Афанасьева И. Н.* Численное моделирование задач строительной аэродинамики. Разработка методик расчета ветровых воздействий и исследование реальных объектов // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4-5. – С. 182–185.
10. Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer / Talbot [et al.] // Fluid Mech. – 1980. – № 101(4). – P. 737–758.
11. *Menter F. R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, № 8. – P. 269–289.
12. *Menter F. R.* Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows // AIAA Paper. – 1993. – № 93-2906. – 22 p.

И. А. Готюр,
доктор технических наук, профессор;
Ю. Д. Овчинников

АППРОКСИМАЦИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НАБЛЮДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ НОРМАЛИЗУЮЩИХ ПОТОКОВ С ЯЧЕЙКАМИ LSTM ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

В работе рассмотрен вопрос моделирования (аппроксимации) функции распределения условной плотности вероятности для случайного процесса на основе эмпирических данных с применением нормализующих потоков. Для обобщения темпорального признака в данных модель построена с использованием ячеек LSTM.

Показана эффективность предложенного подхода для моделирования условной вероятности возникновения опасных метеорологических явлений на примере сверхкраткосрочного прогнозирования конвективных ливневых осадков. Показано, что интегрирование LSTM ячеек в модель нормализующих потоков повышает оправданность сверхкраткосрочного прогноза конвективных ливневых осадков за счет учета темпоральной структуры предикторов, что подтверждается метрикой ROC-AUC.

Сделаны выводы о способах дальнейшего повышения эффективности моделирования атмосферных процессов с использованием моделей машинного обучения.

Ключевые слова: временные ряды, нормализующие потоки, ячейки LSTM, условная плотность вероятности.

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования и стандарты, применяемые в сферах обеспечения безопасности и устойчивого развития, требуют правильного учета сложного многофакторного влияния гидрометеорологических условий, с одной стороны, и непрерывного совершенствования методов прогнозирования и прогностических моделей – с другой.

В настоящее время активно развиваются численные методы прогнозирования в рамках физико-статистического и динамико-стохастического подходов [1], основанных на использовании больших выборок данных (*data-driven approach*) [2], чему способствует наличие большого объема метеорологических данных за длительный период времени [3, 4]. Совершенствование прогностических моделей в рамках данных подходов осуществляется с применением современных моделей глубокого машинного обучения (далее – ГМО) – глубоких нейронных сетей, комбинированных (гибридных) моделей.

Исходя из анализа работ, посвященных данному вопросу [5, 6], можно с уверенностью утверждать, что использование физико-статистических моделей, в том числе моделей машинного обучения, позволяет достичь высокого качества прогнозирования мезомасштабных атмосферных процессов на сверхкраткосрочных временных интервалах.

Так, модели ГМО часто демонстрируют сопоставимую или превосходящую эффективность в сравнении с гидродинамическими моделями в задачах прогнозирования состояния полей метеорологических величин и опасных метеорологических явлений на временных интервалах до трех суток (рис. 1).

Применение более совершенных моделей, способных обобщить больше информации из данных, или, что то же самое, точнее аппроксимировать процесс, генерирующий данные, позволит уменьшить разрыв между актуальными требованиями к качеству прогнозирования опасных метеорологических явлений и достижимой на современном этапе точностью прогнозирования в условиях ограничений, предъявляемых к оперативным моделям.

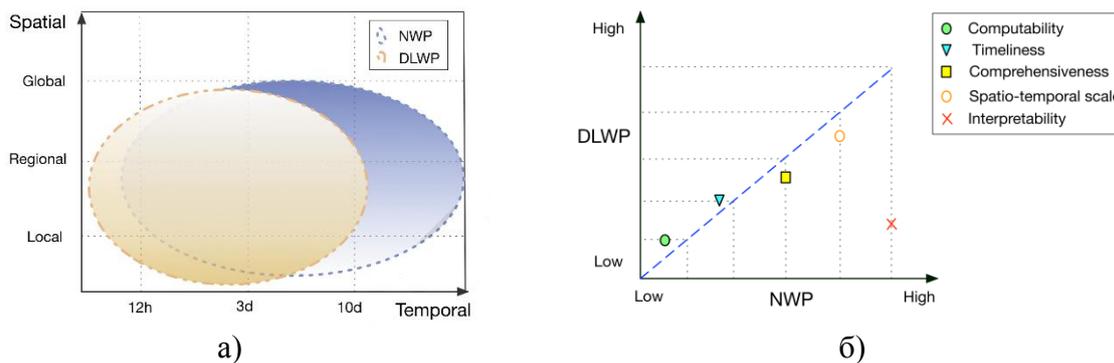


Рис. 1. Сравнительная эффективность гидродинамического (NWP) и ГМО (DLWP) методов численного прогнозирования (более темный цвет на графике означает большую эффективность):
 а – в зависимости от масштабов пространства и времени;
 б – в зависимости от выбранного критерия

Анализ современных исследований в данном направлении [7–9] позволяет сделать вывод о том, что для решения задач аппроксимации процессов, демонстрирующих сложные пространственно-временные корреляции на коротких пространственно-временных интервалах, наиболее подходящими являются модели ГМО и комбинированные прогностические модели. С учетом этого синтез прогностической модели может быть осуществим в классе моделей ГМО.

МОДЕЛЬ НОРМАЛИЗУЮЩИХ ПОТОКОВ С LSTM ЯЧЕЙКАМИ

Для оценки информативности предикторов аппроксимация эмпирической условной плотности распределения данных моделью должна удовлетворять условиям дифференцируемости и обратимости [10, 11]. Данным условиям удовлетворяет модель нормализующих потоков – аппроксимированная нормализующими потоками функция условной плотности вероятности для эмпирических данных (выборки) находится в классе дифференцируемых обратимых функций, что гарантируется структурой ядра модели.

Для улучшения обобщающей способности нормализующие потоки могут быть реализованы на основе широкого класса других моделей [12]. Поскольку нормализующие потоки в исходном виде не позволяют обобщать темпоральный признак в данных, для аппроксимации временных рядов данных модель дополнена ячейками LSTM (*long-short memory*), т. е. для придания модели обобщающей способности в контексте усвоения темпорального признака в данных в структуру модели интегрированы ячейки LSTM [13, 14].

Ячейки LSTM широко применяются в моделях, предназначенных для работы с временными рядами [15]. Кроме того, некоторое дополнительное преимущество, цена которого – увеличение сложности модели, можно получить, используя ячейки Bi-LSTM, позволяющие оперировать одновременно контекстом из прошлого и из будущего [16].

Общая структура модели для аппроксимации эмпирического условного распределения прогнозируемого параметра с LSTM ячейками показана на рис. 2.

Введем обозначения:

$\mathbf{X} = \{\mathbf{x}\}$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{d+1}$ – реализация многомерной дискретной случайной величины с плотностью распределения $p(\mathbf{X})$;

$\Theta = \{\theta\}$, $\Theta \subset \mathbf{X}$ – некоторое подмножество, где \mathbf{X} – реализация оцениваемых параметров, причем такое, что

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_{\setminus \theta}, \boldsymbol{\theta}], \mathbf{x}_{\setminus \theta} \in \mathbb{R}^{d+1-\dim \theta}; \quad (1)$$

$\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^d$ – вектор измерений для дискретного времени $k \in \mathbb{Z}$;

$\mathbf{x}_{1:N} = \{\mathbf{x}_k\}, k = \{1, 2, \dots, N\}$ – временной ряд наблюдений из N последовательных измерений на интервале времени $\mathbf{t}_{\text{набл.}} = [t_1; t_N], \|\mathbf{t}_{\text{набл.}}\| = T$ – вектор предикторов.

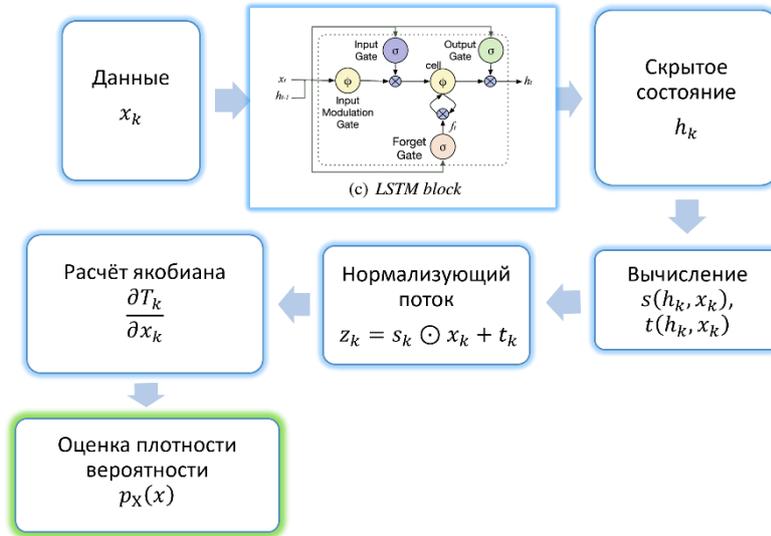


Рис. 2. Структура модели нормализующих потоков с LSTM ячейками

Тогда, как было показано в работе [10], случайная величина $\boldsymbol{\theta}_{N+1}$ может быть выражена с использованием модели нормализующих потоков следующим образом:

$$\boldsymbol{\theta}_{N+1} = \mathbf{f}(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1}), \quad (2)$$

где $\mathbf{f}(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1})$ – обратимая дифференцируемая биекция;

$\boldsymbol{\varphi}_{N+1}$ – вектор параметров нормализующего потока.

Параметр нормализующего $\boldsymbol{\varphi}_{N+1}$ потока вычисляется от скрытого состояния LSTM ячейки \mathbf{h}_N :

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\omega}(\mathbf{h}_N); \mathbf{h}_N = \text{LSTM}(\mathbf{h}_{N-1}, \mathbf{x}_N), \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{h}_N)$ – некоторое отображение из пространства скрытых гиперпараметров LSTM ячейки в пространство параметров нормализующих потоков. На практике [17] $\boldsymbol{\omega}(\mathbf{h}_N)$ часто реализуется с помощью *небольших* нейронных сетей с нелинейным выходом.

Для реализации необходимой обобщающей способности модели векторная функция $\mathbf{f}(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1})$ должна быть достаточно сложной для аппроксимации сложных зависимостей в данных, и в то же время необходимо, чтобы существовал якобиан преобразования в простой форме. Достигается это путем представления $\mathbf{f}(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1})$ композицией последовательных достаточно простых специальным образом сконструированных преобразований:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1}) &= f_K \circ f_{K-1} \circ \dots \circ f_1(\mathbf{z}; \boldsymbol{\varphi}_{N+1}); \\ \boldsymbol{\varphi}_{N+1} &= \left\{ \boldsymbol{\varphi}_{N+1}^{(i)} \mid i = \{1, 2, \dots, K\} \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве преобразований f_i могут использоваться такие, как, например, аффинные преобразования с маскированием, свёртки, авторегрессионные преобразования, кусочно-линейные или кусочно-кубические сплайны: ReLU (*Rectified Linear Unit*), MAF (*Masked Autoregressive Flow*), NICE (*Non-linear Independent Component Estimation*), Real NVP (*Real-valued Non-Volume Preserving transformations*), Glow и др. [18].

Для трансформации базового распределения $p_Z(\mathbf{z})$ авторами выбрано аффинное преобразование с маскированием в силу простоты его реализации и вычисления, а также существования для него якобиана в простой форме. Для преобразования f_i входной вектор \mathbf{z}_{i-1} , полученный в результате преобразования f_{i-1} , разбивается на две составляющие:

$$\mathbf{z}_{i-1} = [\mathbf{u}, \mathbf{v}], \quad (5)$$

и они преобразуются затем в соответствии с выражением

$$\begin{cases} \mathbf{u}' = \mathbf{u}; \\ \mathbf{v}' = \mathbf{v} \odot \exp\left(s(\mathbf{u}, \varphi_{N+1}^{(i)})\right) + t(\mathbf{u}, \varphi_{N+1}^{(i)}), \end{cases} \quad (6)$$

где $\exp\left(s(\mathbf{u}, \varphi_{N+1}^{(i)})\right)$, $t(\mathbf{u}, \varphi_{N+1}^{(i)})$ – функции масштабирования и сдвига, параметризованные преобразованием $\omega(\mathbf{h}_N)$.

Матрица Якоби для векторной функции f_i имеет вид

$$\frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{z}_{i-1}} = J_f^{(i)} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial \mathbf{u}} & \text{diag}\left[\exp\left(s(\mathbf{u}, \varphi_{N+1}^{(i)})\right)\right] \end{pmatrix}. \quad (7)$$

С использованием того факта, что матрица Якоби для аффинного преобразования с маскированием – треугольная, логарифм определителя якобиана, применяемый при переходе от переменной \mathbf{z} в моделируемом распределении к искомой переменной θ_{N+1} , записывается в следующей форме:

$$\log|J_f^{(i)}| = \sum_j s_j(\mathbf{u}, \varphi_{N+1}^{(i)}). \quad (8)$$

С использованием свойства якобиана

$$|J^{-1}| = |J|^{-1} \quad (9)$$

запишем итоговое выражение для искомой оценки условной плотности вероятности $p(\theta|\mathbf{x})$, аппроксимированной нормализующими потоками:

$$\hat{p}(\theta_{N+1}|\mathbf{x}_{1:N}) = p_Z(\mathbf{z}) \prod_{i=1}^K |J_f^{(i)}|^{-1}. \quad (10)$$

Тогда оценку логарифмической функции правдоподобия $\hat{L}(\theta|\mathbf{x})$ для параметра θ с учетом выражения (8) определим как

$$\hat{L}(\theta|\mathbf{x}) = \log \hat{p}(\theta_{N+1}|\mathbf{x}_{1:N}) = \log p_Z(\mathbf{z}) - \sum_{i=1}^K |J_f^{(i)}|, \quad (11)$$

где $J_f^{(i)}$ – якобиан преобразования $f_i(\mathbf{z}; \varphi_{N+1})$, т. е.

$$J_f^{(i)} = \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{z}_{i-1}}. \quad (12)$$

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Решая задачу прогнозирования опасных метеорологических явлений с применением физико-статистического подхода и методов машинного обучения [19, 20], необходимо синтезировать прогностическую модель и затем настроить ее в соответствии с наблюдаемыми дан-

ными измерений метеорологических величин, т. е. обучить модель. Или, иными словами, обобщить процесс, производящий наблюдаемые данные, т. е. оценить параметры процесса в рамках используемой обобщающей модели, применяя обучающую выборку из данных. Выборка должна обладать свойствами информативности и репрезентативности относительно параметров процесса в контексте используемой обобщающей модели. Согласно вышесказанному должна существовать достаточная статистика от обучающей выборки, позволяющая извлечь из данных достаточное количество информации об оцениваемых параметрах для их оценки с требуемым качеством (точностью).

В качестве исходных данных, удовлетворяющих требованиям к выборке, выбраны наблюдения для летних месяцев и по физико-географическому району Ленинградской области. Вектор предикторов представлен временным рядом значений основных параметров тропосферы: скорости ветра на высоте 10 м, направления ветра, температуры воздуха, температуры точки росы, приземного атмосферного давления. Ряд составлен из значений перечисленных параметров с интервалом 1 ч общей продолжительностью $\tau = 12$ ч (рис. 3).

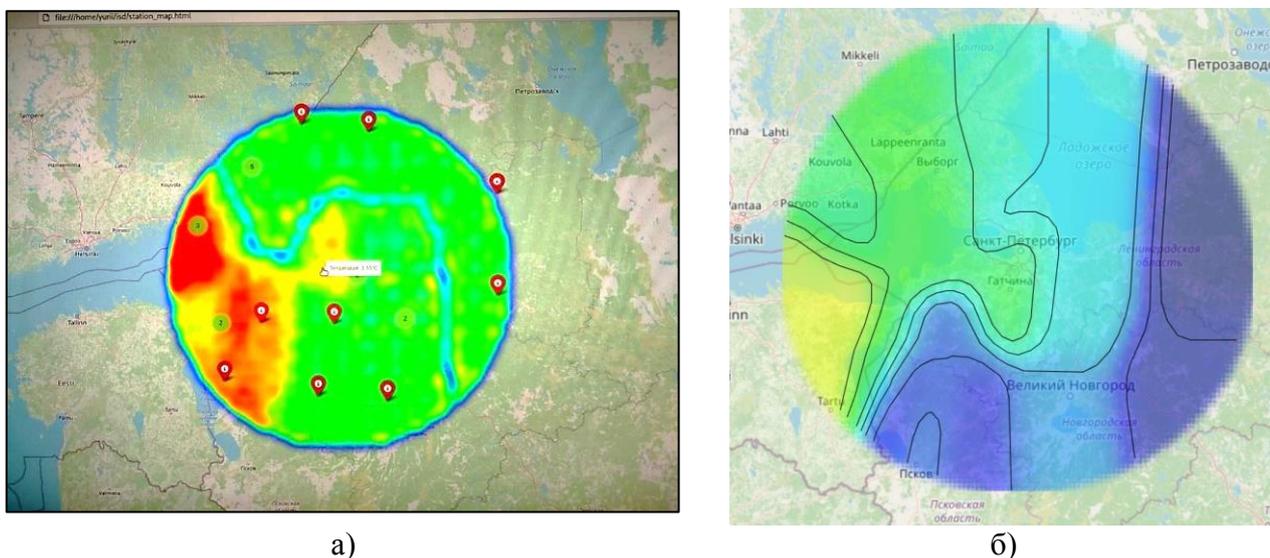


Рис. 3. Визуализация компонент предикторов обучающей выборки:
 а – приземной температуры воздуха, °С;
 б – значения точки росы, °С

В качестве оцениваемого параметра рассмотрена вероятность возникновения опасного метеорологического явления – конвективных ливневых осадков – на сверхкраткосрочном интервале заблаговременности. Вероятность конвективных ливневых осадков прогнозируется с удовлетворительной надежностью физико-статистическими методами, что позволит сравнить метрики качества прогнозирования, полученные с применением существующих моделей и модели, предложенной авторами, а также извлечь полезную информацию из анализа и сравнения моделей.

Критерий оптимизации для обучения модели – минимизация отрицательного правдоподобия, что эквивалентно минимизации расстояния Кульбака – Лейблера между модельным распределением и эмпирическим. Данные для обучения модели нормализованы: они нормированы и центрированы своими распределениями (поскольку модели чувствительны к масштабу входных переменных) с целью минимизации риска ошибочного захвата внимания модели данными с большей амплитудой.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для выборки из данных наземных наблюдений, сформированной описанным выше способом, произведена оценка условной плотности распределения предикторов и параметра $\hat{p}(\Theta_{N+1} | \mathbf{x}_{1:N})$ с использованием следующих моделей:

- модели нормализующих потоков (**NF** – *Normalizing Flow*);
- разработанной авторами модели нормализующих потоков с ячейками LSTM (**NF+LSTM** – *Normalizing Flow with LSTM*);
- модели многофакторной линейной регрессионной (**LR** – *Linear Regression*).

Для каждой модели с использованием апостериорного совместного распределения модельных данных прогнозирования и реализации прогнозируемой величины построена кривая ошибок [ROC-кривая (*Receiver Operating Characteristic*)], которая является характеристикой оправдываемости прогноза, позволяющей оценить качество модели с точки зрения бинарной классификации – прогнозирования опасных метеорологических явлений (рис. 4). При этом площадь под кривой ошибок [AUC (*Area Under Curve*)] – это мера способности дискриминатора различения классифицируемых объектов или, иными словами, качества прогностической модели.

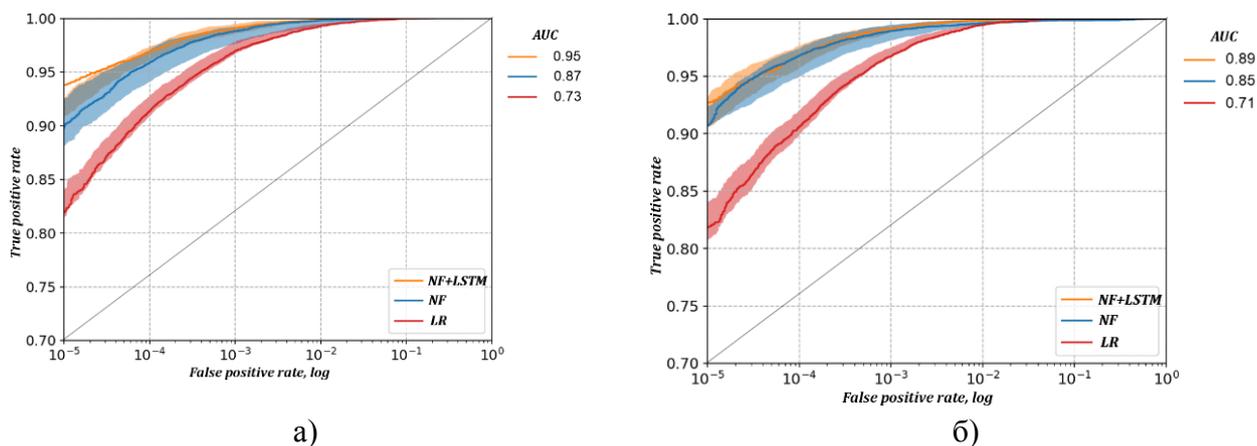


Рис. 4. Результаты ROC-AUC анализа с доверительным интервалом 0,9 для моделей **NF**, **NF+LSTM**, **LR**:
 а – для обучающей выборки данных;
 б – для проверочной выборки

Прогнозирование выполнено путем вычисления аппроксимированной условной плотности (функции правдоподобия) и порога вероятности, оптимального с точки зрения максимизации площади под ROC-кривой для каждой из моделей. При этом прогноз строится на 6 ч вперед на основе имеющегося 12-часового фрагмента временных рядов.

Анализ результатов моделирования показывает следующее:

- линейная регрессионная модель (**LR**) дает наименее точные результаты, что можно объяснить существенно нелинейной природой процесса, генерирующего данные, и исследуемого явления – конвективных осадков;
- модель нормализующих потоков (**NF**) обобщает нелинейные зависимости в данных, но без учета временной структуры – задержанных по времени корреляций;
- предлагаемая модель **NF+LSTM** характеризуется более высоким значением AUC, поскольку LSTM ячейки позволяют обобщать темпоральные признаки и таким образом извлечь больше информации из данных, т. е. получить более высокое значение информативности данных в контексте обобщающей модели.

Таким образом, предложенная модель нормализующих потоков с ячейками LSTM позволяет получить более точную оценку условной плотности вероятности возникновения конвективных ливневых осадков на сверхкраткосрочном временном интервале прогнозирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования, показанные выше, позволяют сделать вывод о том, что интегрирование LSTM ячеек в модель нормализующих потоков повышает оправданность сверхкраткосрочного прогноза конвективных ливневых осадков за счет обобщения моделью темпоральной структуры предикторов.

В рамках физико-статистического подхода предложенная модель нормализующих потоков с ячейками LSTM дает более надежные оценки вероятности реализации конвективных ливневых осадков на сверхкраткосрочном временном интервале прогнозирования по сравнению с многофакторной линейной регрессией и базовой моделью нормализующих потоков.

Дальнейшее улучшение качества прогнозирования (обобщающей способности модели) может быть реализовано, по мнению авторов, путем увеличения сложности архитектуры нормализующих потоков:

- применением более сложных обратимых преобразований в составе потоков;
- использованием Bi-LSTM ячеек, позволяющих на этапе обучения модели оперировать контекстом из прошлого и «будущего» – производить оценку параметров процесса с учетом фактически реализовавшихся значений предикторов;
- оптимизацией состава вектора предикторов с использованием критерия информативности.

Список используемых источников

1. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии / В. С. Комаров [и др.]; под общ. ред. Г. Г. Матвиенко. – Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2004. – 236 с.
2. Deep Learning-Based Weather Prediction: A Survey / X. Ren [et al.]. – URL : <https://arxiv.org/abs/2211.08066> (дата обращения: 16.12.2024).
3. The rise of machine learning in weather forecasting / M. Chantry [et al.]. – URL : <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/science-blog/2023/rise-machine-learning-weather-forecasting> (дата обращения: 16.12.2024).
4. Винштейн И. Нейросетевая революция в метеорологии. Как машинное обучение может навсегда изменить прогноз погоды. – URL : <https://habr.com/ru/articles/775236/> (дата обращения: 16.12.2024).
5. Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting / X. Shi [et al.] // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2015. – Vol. 28. – P. 802–810.
6. Precipitation Nowcasting with Satellite Imagery / V. Lebedev [et al.]. – URL : <https://www.researchgate.net/publication/334719455> (дата обращения: 16.12.2024).
7. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks / K. Bi [et al.] // *Nature*. – 2023. – Vol. 619, № 7970. – P. 533–538.
8. Olivetti L. and Messori G. Advances and prospects of deep learning for medium-range extreme weather forecasting // *Geosci. Model Dev.* – 2023. – № 17. – P. 2347–2358.
9. Zhang G.P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model // *Neurocomputing*. – 2003. – Vol. 50. – P. 159–175.

10. Готюр И. А., Овчинников Ю. Д. Оценка информативности предикторов для прогнозирования опасных метеорологических явлений с применением модели глубокого машинного обучения // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – Вып. 692. – С. 104–111.
11. Покровский О. М. Оптимизация метеорологического зондирования атмосферы со спутников. – Л. : Гидрометиздат, 1984. – 264 с.
12. Normalizing Flows for Probabilistic Modeling and Inference / G. Papamakarios [et al.] // Journal of Machine Learning Research. – 2021. – Vol. 22, Article 57. – P. 1–64.
13. Sepp Hochreiter; Jürgen Schmidhuber. Long short-term memory // Neural Computation : journal. – 1997. – Vol. 9, № 8. – P. 1735–1780.
14. LSTM-based Conditional Normalizing Flow for Sequence Generation / Y. Rao [et al.]. – 2020. – 31 p.
15. Financial time series forecasting with deep learning: A systematic literature review: 2005–2019 / O. Sezer [et al.] // Applied Soft Computing. – 2020. – Vol. 90. – Article 106181. – URL: <https://arxiv.org/abs/1911.13288>. – Дата публикации: 25.02.2020.
16. Zenkner G., Navarro-Martinez S. A flexible and lightweight deep learning weather forecasting model. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10489-023-04824-w> (дата обращения: 16.12.2024).
17. NICE: Non-linear Independent Components Estimation / L. Dinh [et al.]. – 2014. – URL: <https://arxiv.org/abs/1410.8516> (дата обращения: 22.01.2025).
18. Density Estimation using Real NVP / L. Dinh [et al.]. – 2017. – URL: <https://arxiv.org/abs/1605.08803> (дата обращения: 16.12.2024).
19. Шемелов В. А. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – Ч. 2. – 134 с.
20. A Machine Learning Tutorial for Operational Meteorology. Part II: Neural Networks and Deep Learning / R. Chase [et al.] // Weather and Forecasting. – 2023. – Vol. 38, № 8. – P. 1271–1293.

О. В. Кучеренко,
кандидат технических наук;
Д. О. Медяников,
кандидат технических наук;
С. Н. Печников;
Д. В. Сергеев,
кандидат технических наук

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНИВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Статья посвящена оцениванию точности определения пространственного положения пунктов в режиме реального времени (RTK – *real time kinematic*) в зависимости от расстояния до базовых станций коммерческих компаний с использованием протоколов передачи корректирующей информации RTCM 3.0 и RTCM 3.2. Приводятся результаты экспериментальных исследований, выполненных на топогеодезическом полигоне «Лехтуси». Даются рекомендации по использованию базовых станций при определении пространственного положения пунктов.

Ключевые слова: базовая станция, ровер, RTK, абсолютная ошибка, сеть базовых (референсных) станций.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач координатных определений в настоящее время широко применяется геодезическая аппаратура, работающая по сигналам спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BEIDOU. Актуальной задачей при использовании такой аппаратуры является оперативное создание с ее помощью единого координатного пространства. Такая задача может быть решена путем развертывания сети базовых станций (БС) (спутниковых референсных станций). Постоянно действующая спутниковая БС – аппаратно-программный комплекс, предназначенный для обеспечения выполнения измерений и определения пространственного местоположения объектов путем предоставления корректирующей информации (КИ).

В стандартном исполнении БС состоит из приемника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), спутниковой антенны, источника бесперебойного питания, средства связи и может управляться удаленно с персонального компьютера (ПК) посредством специализированного программного обеспечения. Кроме этого, БС осуществляет формирование спутниковой измерительной информации в целях последующей обработки совместно с данными полевых измерений, а также позволяет вычислять и передавать спутниковые дифференциальные поправки (корректирующую информацию) для определения точных пространственных координат в реальном времени (RTK). Результаты измерений для постобработки архивируются на жесткий диск компьютера БС и передаются по каналам связи на FTP-сервер для удаленного доступа. Пользователи подвижных приемников (роверов) могут получать КИ по радиоканалам, высокоскоростным беспроводным сетям (GSM, GPRS, CDMA и др.) или через сеть Интернет.

Применение сети БС, с одной стороны, обеспечивает необходимую точность решения геодезических задач, а с другой стороны, существенно повышает оперативность решения задач, которую невозможно достичь при использовании традиционных геодезических методов координатных определений (триангуляции, полигонометрии).

При развертывании сети БС каждая станция обеспечивает создание навигационного поля, площадью около 7850 км^2 (при заявленной дальности передачи КИ 50 км), для реализации точных измерений в реальном времени на уровне 5–7 см.

Актуальность научно-технической задачи по оцениванию точности определения пространственного положения пунктов, в зависимости от расстояния до БС, обусловлено необходимостью изучения реальных возможностей применения РТК измерений для решения задач по повышению обороноспособности страны и развитию ее экономики.

Наличие лабораторно-экспериментальной базы и научно-технического потенциала Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского позволило выполнить экспериментальные исследования по оцениванию точности определения пространственного положения пунктов в зависимости от расстояния до БС.

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Исследование точности определения пространственного положения пунктов (вычисление абсолютных ошибок) предполагало выполнение измерений в режиме РТК от различных БС, на пункте с известными значениями координат, с помощью спутниковой геодезической аппаратуры (СГА) с последующим проведением анализа. В качестве пункта с известными значениями координат («эталонного») выбран пункт СМТ-5 топогеодезического полигона (ТПП) «Лехтуси». В качестве измерительной аппаратуры использовалась СГА South Galaxy G1 Plus с IMU (инерциальным датчиком наклона) с GNSS платой Trimble BD990.

Для проведения эксперимента выбраны коммерческие сети БС с наибольшей площадью покрытия: Geospider, EFT-cors и RTKNET (рис. 1). Исходные координаты пункта СМТ-5 и координаты БС Geospider, EFT-cors и RTKNET представлены в разных системах координат на разные эпохи (табл. 1).

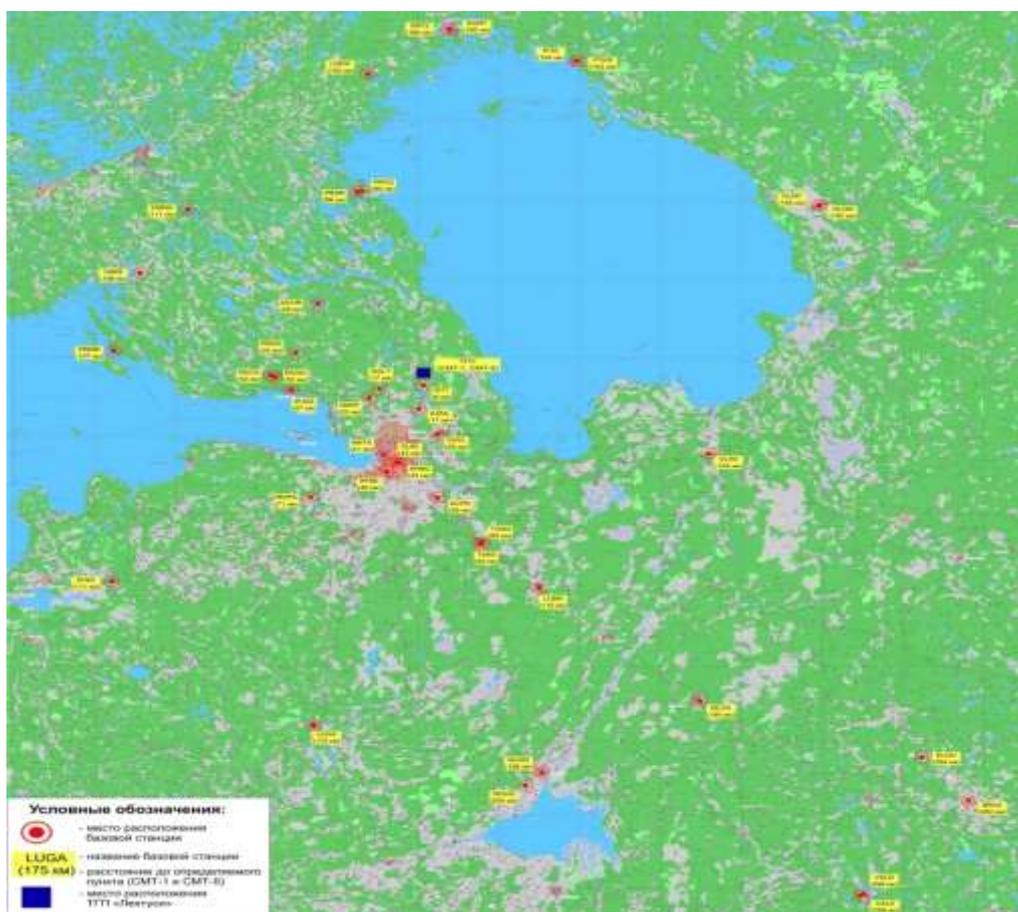


Рис. 1. Схема расположения БС EFT-cors, Geospider, RTKNET, используемых в эксперименте

Таблица 1

Системы координат сетей БС

Сеть БС	Система координат	Эпоха измерения
Geospyder	ITRF-2008	05.27.2013
EFT-cors	ITRF-2014	01.01.2010
RTKNET	ITRF-2014	01.01.2010

Для корректного оценивания точности измерений исходные координаты и высота пункта СМТ-5 были определены в системах координат ITRF-2008 (05.27.2013) и ITRF-2014 (01.01.2010). Пересчет координат пункта СМТ-5 из системы ITRF-2014 (01.01.2010) в систему ITRF-2008 (01.01.2010) выполнен с использованием параметров перехода, представленных в табл. 2 [1], по формуле

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRF2008}} = (1+m) \begin{pmatrix} 1 & +\omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & +\omega_x \\ +\omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{ITRF2014}} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – линейные элементы трансформирования систем координат при переходе из системы ITRF-2014 в систему ITRF-2008, в м;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – угловые элементы трансформирования систем координат при переходе из системы ITRF-2014 в систему ITRF-2008, в рад.;

m – масштабный элемент трансформирования систем координат при переходе из системы ITRF-2014 в систему ITRF-2008.

Таблица 2

**Рекомендуемые элементы трансформирования
при переходе из системы ITRF-2014 в систему ITRF-2008 на эпоху 01.01.2010**

ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	ω_x , 10^{-3} угл. с	ω_y , 10^{-3} угл. с	ω_z , 10^{-3} угл. с	m , 10^{-6}
+0,0016	+0,0019	+0,0024	0	0	0	-0,00002

Рекомендуемые элементы трансформирования, представленные в табл. 2, при переходе в систему ITRF-2008 на эпоху 01.01.2010 получены последовательным пересчетом вектора координат глобально распределенных пунктов, заданных в системе ITRF-2014 (IGb14) на эпоху 01.01.2010 с учетом геодинамики и последующим выводом соответствующих элементов трансформирования.

Координаты пункта СМТ-5 пересчитаны на эпоху 05.27.2013 по формуле

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{t_2} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{t_1} + (t_2 - t_1) \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{pmatrix}_{t_1}, \quad (2)$$

где t_1 – исходная эпоха;

t_2 – заданная эпоха;

X, Y, Z – координаты пункта на исходную или заданную эпоху;

$\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$ – скорости изменения координат пунктов.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНИВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТА СМТ-5
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО БАЗОВОЙ СТАНЦИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТОКОЛА ПЕРЕДАЧИ
КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИИ RTCM 3.0**

После завершения подготовительных работ выполнены измерения СГА в режиме RTK на пункте СМТ-5 с использованием протокола передачи КИ RTCM-3.0 (ГЛОНАСС, GPS) от БС Geospider. Результаты измерений представлены табл. 3–6, где указаны:

- в столбце 1 – имя БС, от которой выполнены измерения до пункта СМТ-5;
- в столбце 2 – средняя квадратическая ошибка (СКО) определения планового положения;
- в столбце 3 – СКО определения высоты;
- в столбце 4 – расстояние от БС до пункта СМТ-5;
- в столбце 5 – геометрический фактор точности определения местоположения (PDOP);
- в столбце 6 – количество отслеживаемых спутников;
- в столбце 7 – количество спутников, используемых для определения местоположения;
- в столбцах 8–10 – абсолютные ошибки координат определяемого пункта.

Таблица 3

**Результаты измерений на пункте СМТ-5, полученные от сети БС Geospider
[ITRF-2008 (05.27.2013)] с использованием протокола передачи данных RTCM 3.0**

Имя БС	HRMS, м	VRMS, м	Расстояние до БС, м	PDOP	Отсл. спут.	Исп. спут.	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KZML	0,010	0,018	16903,846	1,46	35	16	-0,020	-0,021	-0,066
AGLT	0,010	0,019	17436,301	1,40	35	16	-0,021	-0,024	-0,066
NSRT	0,011	0,020	22632,766	1,46	34	15	-0,016	-0,021	-0,058
BNTA	0,013	0,024	41382,312	1,44	38	17	-0,040	-0,032	-0,064
SL55	0,012	0,026	43567,352	1,57	36	16	-0,014	-0,003	-0,057
PRVM	0,012	0,026	45480,184	1,62	35	15	-0,034	-0,020	-0,055
ZLNG	0,012	0,026	46719,941	1,46	35	16	-0,023	-0,023	-0,052
RSCH	0,013	0,028	52023,520	1,46	36	17	-0,010	-0,015	-0,050
KLPN	0,041	0,056	59634,164	1,46	35	15	-0,005	-0,009	-0,057
TSN3	0,072	0,112	84078,156	1,46	35	15	0,027	-0,014	-0,069
PRZR	0,069	0,116	88326,180	1,57	35	16	-0,035	-0,008	-0,067
PRMR	0,062	0,112	107231,477	1,57	36	16	-0,042	-0,024	-0,073
VBR2	0,066	0,108	107998,312	1,57	35	16	-0,026	-0,014	-0,037
LUBN	0,075	0,092	110288,297	1,40	37	15	0,000	0,002	-0,050
KMNG	0,130	0,150	111509,508	1,57	35	15	0,097	0,122	-0,008
LDPN	0,162	0,238	140802,844	1,51	35	16	-0,154	-0,017	-0,010
PTKR	0,102	0,174	153970,875	1,51	35	15	-0,176	-0,046	-0,183
SRT2	0,146	0,212	160029,094	1,46	36	16	-0,123	-0,053	0,047

По результатам данных табл. 3 построены графики изменения точности определения координат в зависимости от расстояния до БС (рис. 2).

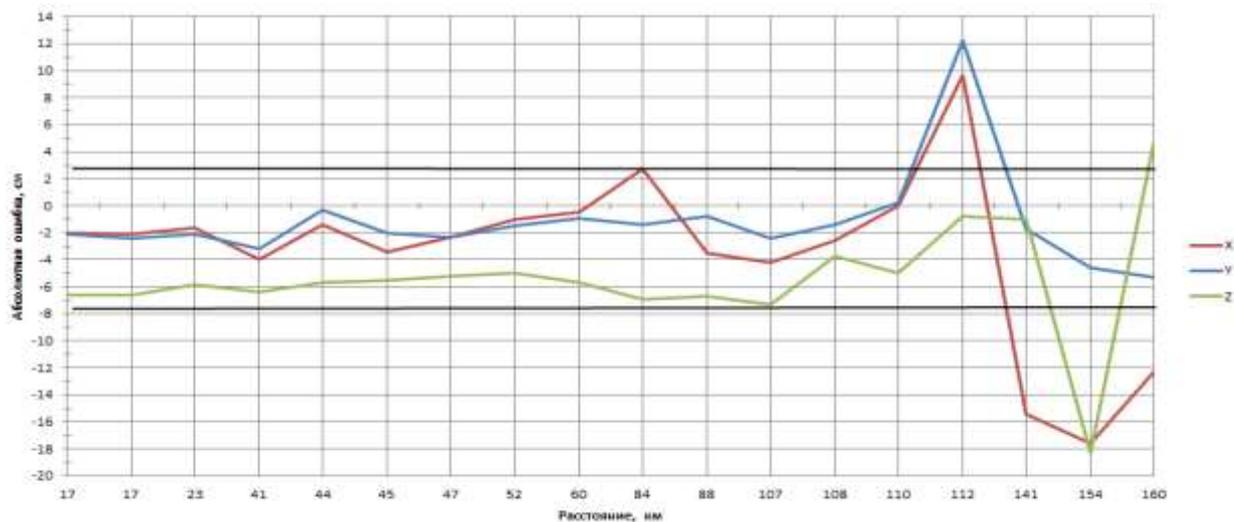


Рис. 2. График изменения точности определения координат пункта СМТ-5 в зависимости от удаления БС (ITRF-2008 4.2013) RTCM 3.0

Результаты измерений СГА в режиме RTK на пункте СМТ-5 с использованием протокола передачи КИ RTCM-3.0 (ГЛОНАСС, GPS) от БС EFT-cors, RTKNET представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений на пункте СМТ-5, полученные от сети БС EFT-cors и RTKNET [ITRF-2014 (01.01.2010)] с использованием протокола передачи данных RTCM 3.0

Имя БС	HRMS, м	VRMS, м	Расстояние до БС, м	PDOP	Отсл. спут.	Исп. спут.	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HITT	0,008	0,011	5761,844	1,39	36	16	-0,028	-0,002	-0,046
SPBG	0,014	0,024	43477,035	1,20	37	15	-0,005	0,009	0,016
SPBE	0,018	0,036	48740,656	1,40	38	14	0,007	0,016	-0,039
ROSH	0,018	0,029	51680,266	1,30	37	16	-0,021	-0,013	-0,018
ROPS	0,063	0,083	71362,070	1,27	38	17	0,014	0,008	-0,085
TOSN	0,073	0,114	83144,500	1,27	36	17	0,011	0,005	-0,099
PROZ	0,065	0,108	88349,875	1,44	37	14	-0,028	-0,011	-0,008
PITK	0,184	0,219	153778,984	1,30	34	14	-0,227	-0,096	-0,093
OLON	0,224	0,298	154903,891	1,25	36	14	0,012	0,102	0,104
OLNC	0,101	0,144	155154,562	1,21	37	17	-0,048	-0,044	-0,068
SORT	0,180	0,243	159653,234	1,27	38	17	-0,183	-0,163	0,025

По результатам данных табл. 4 построены графики изменения точности определения координат в зависимости от расстояния до БС (рис. 3).

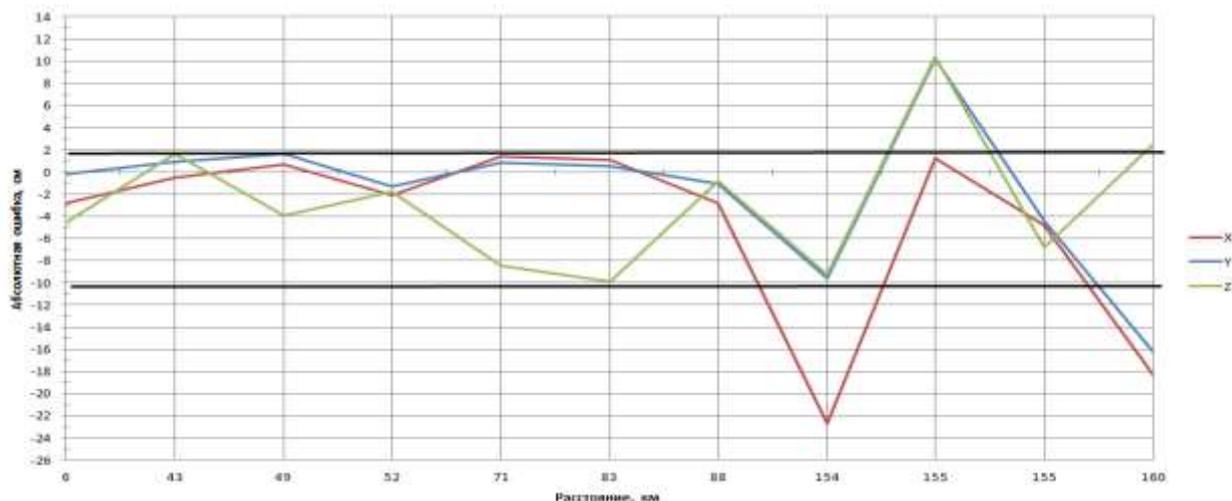


Рис. 3. График изменения точности определения координат пункта СМТ-5 в зависимости от удаления БС (ITRF-2014 001.2010) RTCM 3.0

Анализ данных табл. 3 и 4 позволяет утверждать, что абсолютные ошибки определения координат на расстоянии до 110 км (по протоколу передачи КИ RTCM 3.0) от БС Geospider, EFT-cors, RTKNET в среднем составили в плане $\pm 1,9$ см, а высоты – $\pm 4,9$ см. При расстояниях до БС свыше 110 км значительно снижается точность определения пространственного положения пункта СМТ-5 (абсолютные ошибки определения плановых координат $\pm 10,2$ см, а высоты – $\pm 7,6$ см).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНИВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТА СМТ-5 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО БАЗОВОЙ СТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТОКОЛА ПЕРЕДАЧИ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИИ RTCM 3.2

Измерения СГА в режиме RTK на пункте СМТ-5 выполнялись с использованием протокола передачи RTCM-3.2 (ГЛОНАСС, GPS, BEIDOU, GALILEO) от БС Geospider, EFT-cors, RTKNET. Следует отметить, что при использовании протокола передачи КИ RTCM-3.2 фиксированное решение стало возможным получить на расстоянии свыше 160 км.

Результаты измерений от БС Geospider с использованием протокола передачи RTCM-3.2 представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты измерений на пункте СМТ-5, полученные от сети БС Geospider [ITRF-2008 (05.27.2013)] с использованием протокола передачи данных RTCM 3.2

Имя БС	HRMS, м	VRMS, м	Расстояние до БС, м	PDOP	Отсл. спут.	Исп. спут.	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KZML	0,009	0,014	16903,840	1,08	35	27	-0,012	-0,016	-0,060
AGLT	0,009	0,014	17436,307	1,08	33	29	-0,027	-0,028	-0,052
NSRT	0,009	0,015	22632,773	1,09	35	27	-0,020	-0,018	-0,046
SL55	0,010	0,020	43567,363	1,04	33	23	-0,028	-0,017	-0,065
PRVM	0,010	0,020	45480,180	1,21	33	21	-0,017	-0,018	-0,048
ZLNG	0,010	0,020	46719,945	1,21	33	23	-0,022	-0,017	-0,055

Окончание табл. 5

Имя БС	HRMS, м	VRMS, м	Расстояние до БС, м	PDOP	Отсл. спут.	Исп. спут.	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MCHR	0,010	0,020	49227,359	1,16	33	23	-0,018	-0,018	-0,049
RSCH	0,009	0,020	52023,523	1,04	34	25	-0,010	-0,009	-0,056
KLPN	0,010	0,022	59634,184	1,04	34	24	-0,025	-0,027	-0,065
TSN3	0,020	0,046	84078,188	1,09	34	24	-0,030	-0,017	-0,085
PRZR	0,012	0,027	88326,188	1,13	34	24	-0,015	-0,003	-0,044
PRMR	0,014	0,031	107231,469	1,18	34	24	-0,022	-0,022	-0,063
VBR2	0,014	0,032	107998,320	0,99	34	25	-0,019	-0,014	-0,062
LUBN	0,014	0,032	110288,312	1,09	35	24	-0,017	-0,018	-0,060
KMNG	0,019	0,045	111509,375	1,18	34	22	-0,029	-0,020	-0,074
LDNP	0,018	0,041	140802,953	1,13	35	24	-0,021	-0,010	-0,041
PTKR	0,037	0,044	153970,938	1,13	35	25	-0,043	-0,021	-0,057
SRT2	0,025	0,039	160029,234	1,04	34	25	-0,021	-0,011	-0,031
MLVS	0,016	0,040	185319,719	1,04	36	26	-0,023	-0,018	-0,062
NVGD	0,048	0,071	198546,953	1,04	35	26	-0,048	-0,026	-0,162
BRV2	0,075	0,093	282575,781	1,09	36	25	-0,037	-0,022	-0,140
VAL2	0,116	0,164	298887,156	1,20	35	25	-0,109	0,018	-0,404

По результатам данных табл. 5 построены графики изменения точности определения координат в зависимости от расстояния до БС (рис. 4).

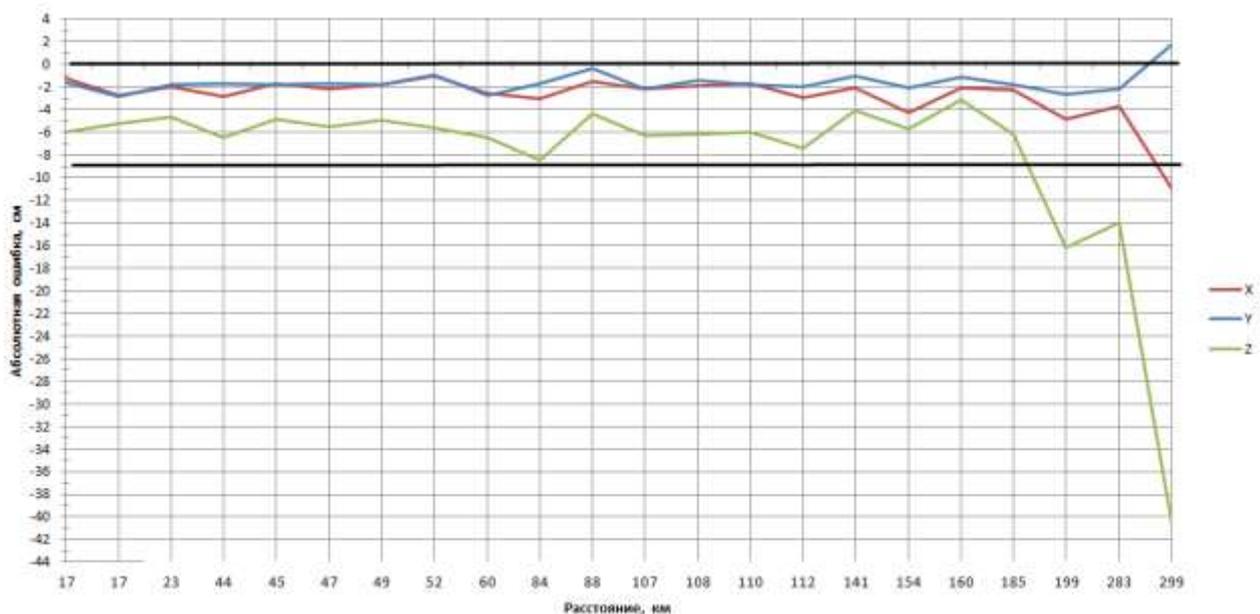


Рис. 4. График изменения точности определения координат пункта СМТ-5 в зависимости от удаления БС (ITRF-2008 4.2013) RTCM 3.2

Результаты измерений СГА в режиме RTK на пункте СМТ-5 с использованием протокола передачи КИ RTCM-3.2 от БС EFT-cors, RTKNET представлены в табл. 6.

По результатам данных табл. 6 построены графики изменения точности определения координат в зависимости от расстояния до БС (рис. 5).

Таблица 6

Результаты измерений на пункте СМТ-5, полученные от сети БС EFT-cors, RTKNET [ITRF-2014 (01.01.2010)] с использованием протокола передачи данных RTCM 3.2

Имя БС	HRMS, м	VRMS, м	Расстояние до БС, м	PDOP	Отсл. спут.	Исп. спут.	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SPBG	0,009	0,020	43477,035	1,31	35	25	-0,003	0,006	0,017
SPBE	0,010	0,020	48740,676	1,18	38	25	-0,006	0,003	-0,028
ROSH	0,011	0,022	51680,266	1,13	38	28	-0,023	-0,011	-0,036
ROPS	0,011	0,024	71362,109	1,13	38	29	-0,014	0,000	-0,045
TOSN	0,012	0,026	83144,547	1,13	36	28	-0,016	-0,014	-0,054
PROZ	0,014	0,031	88349,891	1,04	37	28	-0,014	0,003	0,005
VLHV	0,013	0,029	104441,312	1,04	37	26	-0,035	-0,008	-0,044
PITK	0,055	0,067	153779,109	1,04	35	26	-0,045	0,012	0,000
OLON	0,018	0,043	154903,969	1,26	35	25	0,008	0,020	0,004
OLNC	0,016	0,043	155154,562	1,09	36	28	-0,024	-0,001	-0,051
SORT	0,084	0,090	159653,375	1,13	38	29	-0,069	-0,009	0,051
LUGA	0,139	0,140	175329,562	1,08	37	26	0,091	0,037	-0,105
NOVG	0,019	0,048	203990,203	1,26	35	25	-0,045	-0,025	-0,097
VALD	0,230	0,193	299015,219	1,26	35	25	-0,010	0,094	-0,236

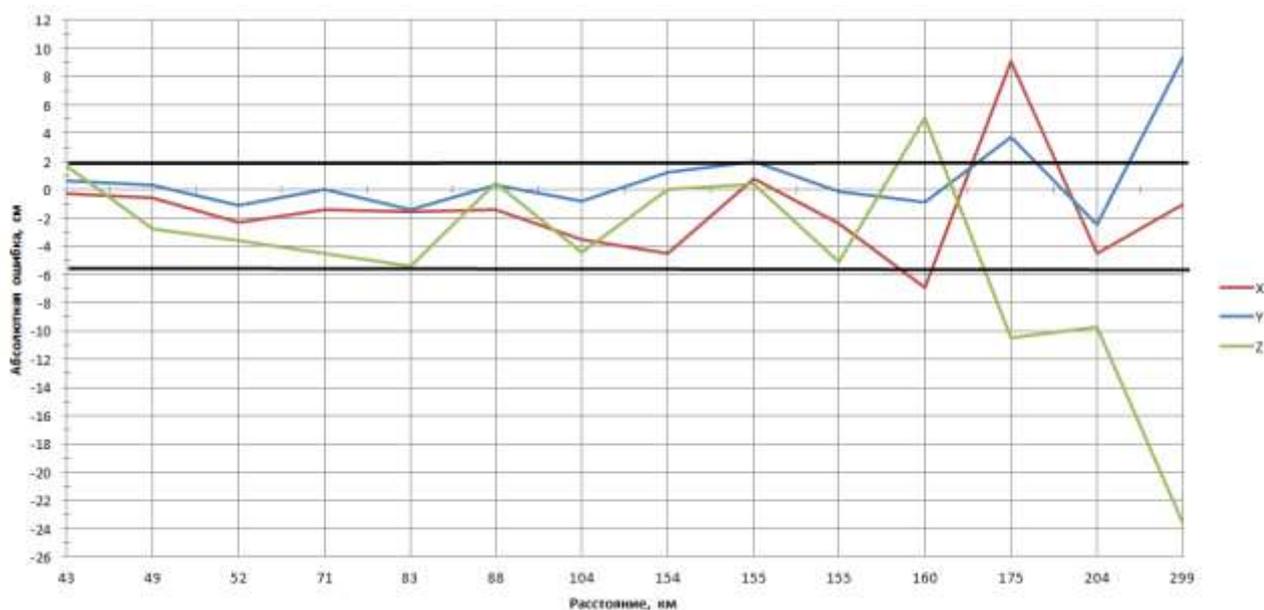


Рис. 5. График изменения точности определения координат пункта СМТ-5 в зависимости от удаления до БС (ITRF-2014 001.2010) RTCM 3.2

Анализ данных табл. 5 и 6 позволяет утверждать, что абсолютные ошибки определения координат на расстоянии до 160 км (по протоколу передачи КИ RTCM 3.2) от БС Geospider, EFT-cors, RTKNET в плановом положении составили $\pm 1,7$ см, а по высоте – $\pm 4,3$ см. При расстояниях до БС свыше 160 км значительно снижается точность определения пространственного положения пункта СМТ-5, особенно по высоте (абсолютные ошибки определения высоты $\pm 19,0$ см).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты оценивания точности, полученные в ходе экспериментальных исследований, показывают, что использование протокола передачи КИ RTCM3.0 (ГЛОНАСС, GPS) на расстоянии до 100–110 км позволяет определять пространственное положение пунктов с абсолютными ошибками плановых координат $\pm 1,9$ см и высот $\pm 4,9$ см (рис. 6).

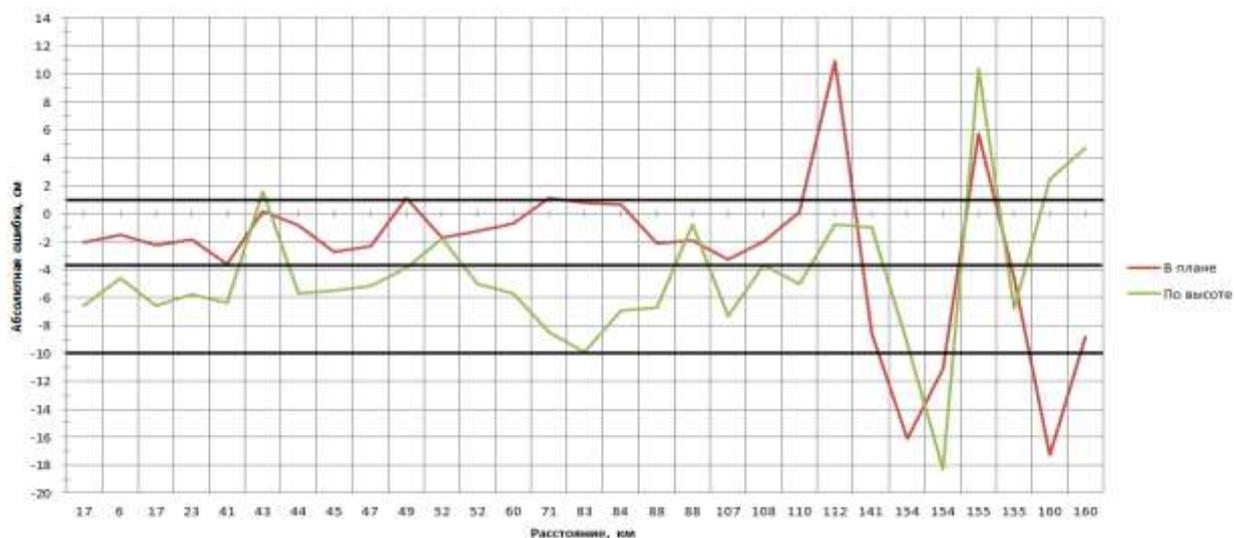


Рис. 6. График изменения точности определения координат пункта СМТ-5 в зависимости от удаления БС (RTCM 3.0)

Использование протокола передачи КИ RTCM 3.2 (ГЛОНАСС, GPS, BEIDOU, GALILEO) на расстоянии до 160 км позволяет определять пространственное положение пунктов с абсолютными ошибками плановых координат $\pm 1,7$ см и высот $\pm 4,3$ см, на расстоянии свыше 160 км абсолютные ошибки определения координат составляют в плане ± 1 см, а по высоте – ± 40 см (рис. 7).

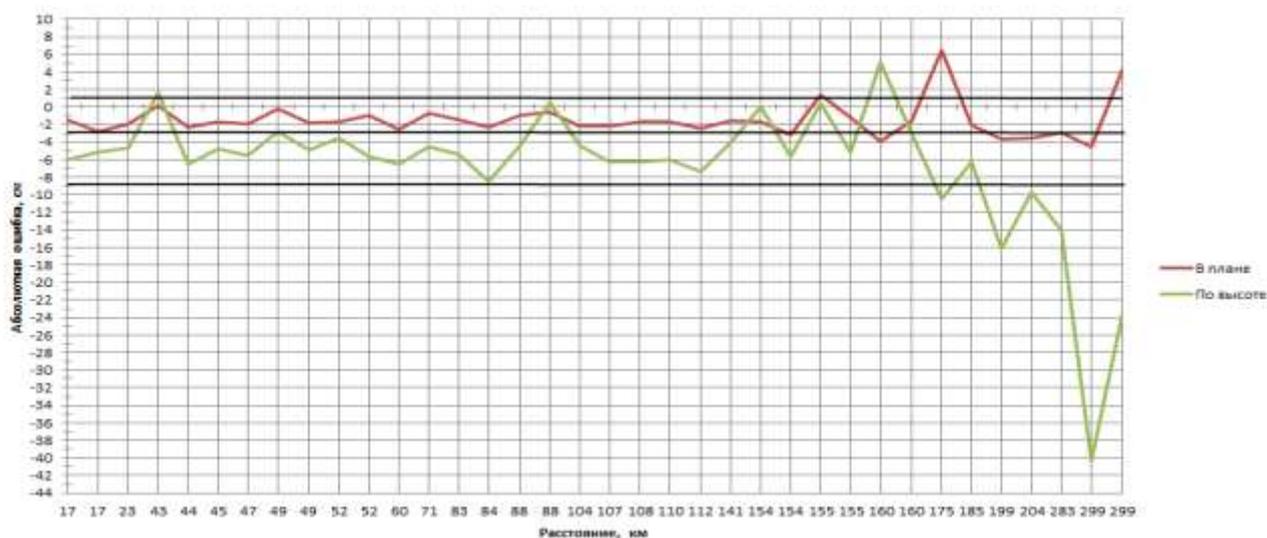


Рис. 7. График изменения точности определения координат пункта СМТ-5 в зависимости от удаления БС (RTCM 3.2)

При выполнении измерений в режиме RTK следует учитывать тот факт, что при получении КИ от БС коммерческих фирм необходимо обращать внимание на систему координат, используемую в сети. Так же необходимо отметить, что КИ передается на подвижный ровер в системе координат сети БС.

Список используемых источников

1. Комплект высокоточной геодезической аппаратуры потребителей ГНСС ГЛОНАСС/GPS/GALILEO/BEIDOU 14Ц8030. Руководство по эксплуатации : в 3 ч. / разработчик КБ НАВИС. – М., 2020. – Ч. 1. – 366 с.

2. *Медяников Д. О., Яковлев А. И.* Методика определения геодезических данных в режиме реального времени (RTK) // Труды ИПА РАН. – 2018. – Вып. 45. – С. 61–65.

3. *Коугия В. А., Брынь М. Я., Гаврилов Ю. А.* Определение координат геодезических пунктов спутниковыми методами : методические указания. – СПб. : ПГУПС, 2003. – 26 с.

4. *Антонович К. М.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. – М. : Картгеоцентр, 2005. – 334 с.

В. В. Андреев¹;

Е. А. Лбов²;

Г. Н. Мальцев¹,

доктор технических наук, профессор

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

²Главный испытательный космический центр МО РФ имени Г. С. Титова,
г. Краснознаменск Московской обл.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ПРОЦЕССЕ ЛЕТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЦЕНТРЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ

Представлен подход к проведению контроля технического состояния и технического диагностирования бортовых систем космических аппаратов в секторе анализа Центра управления полетом с целью повышения оперативности управления космическими аппаратами. Рассмотрены алгоритм проведения контроля технического состояния, технического диагностирования и восстановления работоспособности космического аппарата по результатам обработки телеметрической информации и взаимосвязь факторов, влияющих на достоверность технического диагностирования. Проанализирована взаимосвязь достоверности и полноты контроля технического состояния и надежности бортовых систем космического аппарата, и показана роль научно обоснованного выбора набора контролируемых телеметрических параметров.

Ключевые слова: космический аппарат, контроль технического состояния, техническое диагностирование, информационно-телеметрическое обеспечение.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях одним из важных направлений развития систем управления космическими аппаратами (КА) является развитие системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО). Информационно-телеметрическое обеспечение управления КА включает выполняемые в наземном и бортовом комплексах управления КА операции обработки телеметрической информации (ТМИ) о состоянии бортовой аппаратуры, техническое диагностирование и прогнозирование технического состояния бортовых систем КА. Развитие аппаратно-программных средств автоматизированной обработки ТМИ, с одной стороны, и потребность в оперативной оценке технического состояния КА в Центре управления полетом (ЦУП), с другой стороны, приводят к смещению выполнения операций информационно-телеметрического обеспечения непосредственно в ЦУП КА. Для этого в секторах анализа ЦУП развертываются автоматизированные комплексы обработки и анализа принимаемой с КА ТМИ, обеспечивающие оперативную оценку технического состояния и техническое диагностирование КА для принятия решений по управлению КА в секторе управления ЦУП.

Оперативный контроль технического состояния и техническое диагностирование КА осуществляются по совокупности принимаемых с КА телеметрируемых параметров (ТМП) бортовых систем и по обобщенным параметрам, формируемым для интегральной оценки технического состояния КА и принятия решений по управлению КА.

В настоящей статье рассмотрен общий подход к проведению контроля технического состояния и технического диагностирования бортовых систем космического аппарата в секторе анализа ЦУП.

ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ И СОСТАВЛЯЮЩИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Сложившаяся к настоящему времени технология информационно-телеметрического обеспечения управления КА предполагает несколько этапов обработки принимаемой с КА ТМИ – предварительной, первичной, вторичной [1, 2]. Они отличаются задачами и уровнем оценки состояния бортовой аппаратуры КА – от анализа отдельных ТМП до оценки и прогнозирования технического состояния КА в целом по результатам циклов полного телеметрического контроля. Целью предварительной обработки являются повышение точности и достоверности принятой с КА ТМИ и подготовка исходных данных для решения задач первичной и вторичной обработки. Цель первичной обработки ТМИ состоит в представлении результатов телеметрического контроля КА в требуемой форме и в анализе отдельных телеметрических параметров. Цель вторичной обработки ТМИ заключается в получении обобщенных характеристик состояния бортовых систем КА и в оценке качества его функционирования. При этом могут использоваться обобщенные параметры технического состояния КА. Роль обобщенных параметров технического состояния КА в комплексе задач СИТО состоит в их использовании для поддержки принятия решений по управлению летной эксплуатацией КА и их применению по назначению с учетом текущего технического состояния в условиях большой размерности задачи диагностического контроля КА как сложной технической системы.

По результатам циклов полного телеметрического контроля осуществляются контроль текущего технического состояния и техническое диагностирование бортовой аппаратуры КА [3, 4]. При этом контроль технического состояния КА является самостоятельной задачей СИТО управления КА и одновременно одной из задач технического диагностирования бортовой аппаратуры КА. В результате контроля технического состояния определяется вид технического состояния КА. В результате технического диагностирования определяются место и причины отказа (неисправности) бортовой аппаратуры КА, а также осуществляется прогнозирование ее технического состояния. По результатам выполнения полного телеметрического контроля бортовой аппаратуры КА в ЦУП осуществляются оценка, учет и прогнозирование технического состояния КА, а также оценка степени соответствия характеристик КА установленным в эксплуатационной документации требованиям. На основании оценки технического состояния бортовой аппаратуры КА проводится подготовка решений по управлению КА, порядку его летной эксплуатации и эффективного использования по целевому назначению. В случае обнаружения неисправности по результатам технического диагностирования реализуется восстановление работоспособности КА. Отсюда следует требование к достоверности контроля технического состояния и технического диагностирования КА по принятой ТМИ. Задачи предварительной обработки решаются непосредственно на наземных средствах ее приема с КА – приемно-регистрирующих телеметрических станциях. А задачи первичной и вторичной обработки ТМИ в современных условиях при использовании соответствующих аппаратно-программных средств могут решаться в ЦУП КА, по крайней мере, при функционировании КА в штатных режимах. При этом в секторе управления ЦУП в соответствии с рекомендациями сектора анализа ЦУП реализуется функция управления КА.

На рис. 1 в общем виде представлен алгоритм проведения контроля технического состояния, технического диагностирования и восстановления работоспособности КА по результатам обработки ТМИ в секторе анализа ЦУП. Методика проведения контроля технического состояния и технического диагностирования КА включает следующие четыре этапа.

1-й этап. Производится анализ состояния бортовых систем КА по ТМП, выбранным для контроля, или по обобщенным параметрам путем сравнения их действительных значений

с приведенными в эксплуатационной документации допустимыми значениями. В результате выполнения данного этапа определяется техническое состояние бортовых систем КА.

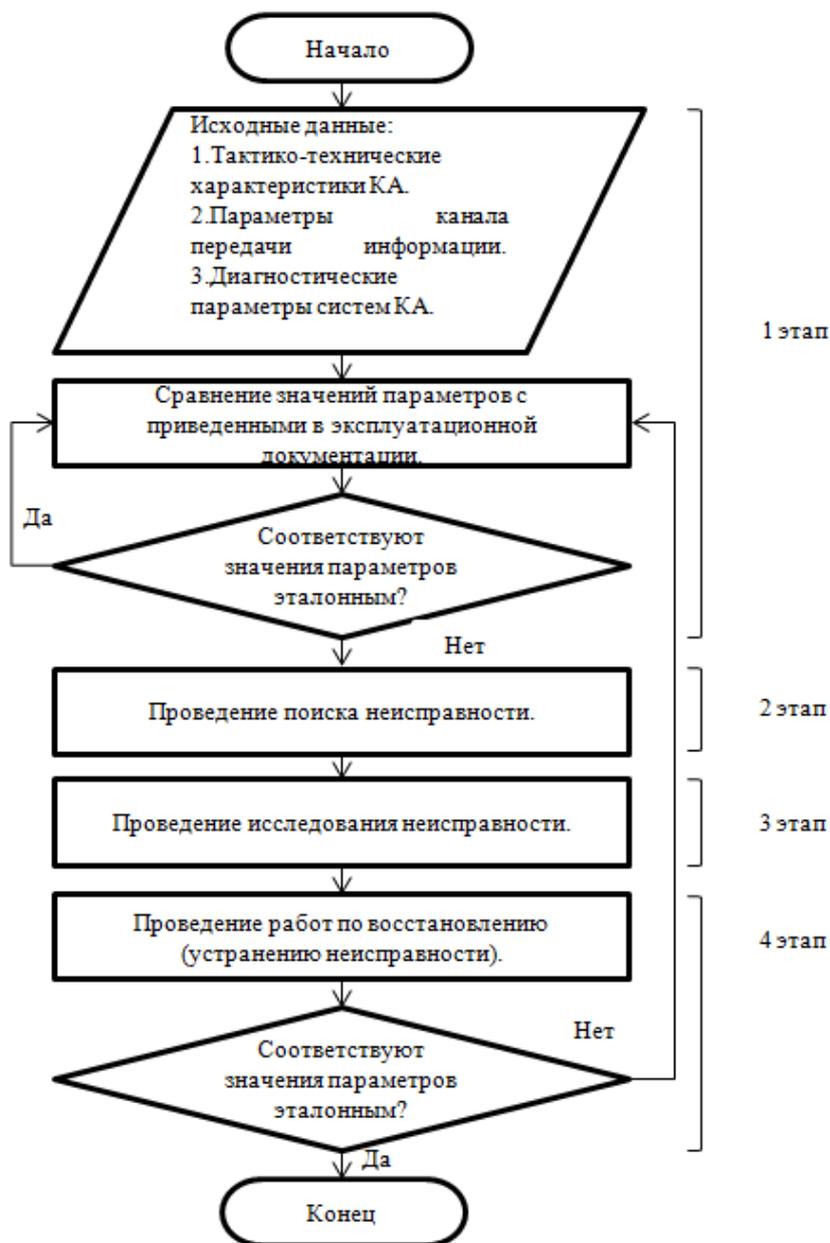


Рис. 1. Алгоритм проведения контроля технического состояния, технического диагностирования и восстановления работоспособности КА

2-й этап. В случае неисправного состояния бортовой системы КА для нее решается задача технического диагностирования – проводится поиск неисправности. На данном этапе осуществляется полный контроль всех ТМП неисправной бортовой системы. В результате выполнения данного этапа определяются поиск и локализация неисправности в бортовых системах КА.

3-й этап. Осуществляются анализ и исследование причин неисправности. Неисправностью может быть несоответствие значений ТМП функционирующей бортовой аппаратуры допустимым величинам, приведенным в эксплуатационной документации, или нарушение функционирования и отказ бортовой аппаратуры. В результате выполнения данного этапа определяется способ устранения (парирования) неисправности.

4-й этап. Происходит устранение неисправности. Методами устранения неисправности могут быть управление режимом работы бортовой аппаратуры для возвращения ее в штатный режим функционирования (если это возможно) или переключение отказавших комплектов бортовой аппаратуры на резервные. В результате выполнения данного этапа осуществляется восстановление работоспособности КА.

Для достижения высокой надежности функционирования КА с длительными сроками активного существования необходимо развитие возможностей по выявлению неисправностей и парированию нештатных ситуаций в бортовой аппаратуре КА бортовым и наземным сегментами СИТО. При этом наземный сегмент СИТО объективно обладает более широкими возможностями по проведению углубленного анализа технического состояния и достоверному техническому диагностированию бортовой аппаратуры КА, что обусловлено ресурсными возможностями наземных аппаратно-программных средств автоматизированной обработки ТМИ. Выполнение функций контроля технического состояния и технического диагностирования бортовых систем КА в секторе анализа ЦУП «приближает» результаты обработки ТМИ, принимаемой с КА, к принятию решений по управлению КА в секторе управления ЦУП, но требует обеспечения высокой достоверности.

Достоверность технического диагностирования бортовой аппаратуры КА зависит от четырех взаимосвязанных между собой факторов: полноты, точности, достоверности и оперативности телеметрического контроля. Полнота телеметрического контроля связана с перечнем и своевременностью контроля ТМП и анализа параметров состояния бортовых систем КА. Точность телеметрического контроля характеризует работу средств СИТО во всех ее звеньях. Достоверность телеметрического контроля оценивается вероятностью того, что определенное по данным телеметрического контроля техническое состояние бортовой системы КА соответствует истинному.

Оперативность телеметрического контроля – это интервал времени от момента запроса на измерение заданных ТМП до момента распознавания в СИТО вида технического состояния бортовой системы КА.

Взаимосвязь составляющих достоверности технического диагностирования бортовой аппаратуры КА показана на рис. 2, на котором обозначены следующие связи: 1 – увеличение числа ТМП и времени их наблюдения влияет на оперативность анализа технического состояния бортовых систем КА, 2-3-5 – полнота, оперативность и точность телеметрического контроля повышают достоверность анализа технического состояния бортовых систем КА, 4 – временные ограничения на процедуры телеметрического контроля находятся в противоречии с числом, временем наблюдения (полнотой) опрашиваемых ТМП, 6-7-8 – требования по достоверности анализа ТМП ограничивают снизу полноту, точность и оперативность телеметрического контроля.

Анализ взаимосвязи составляющих достоверности технического диагностирования бортовой аппаратуры КА показывает, что одновременное выполнение всех требований к достоверности технического диагностирования в рамках одной технологии информационно-телеметрического обеспечения управления КА невозможно. Технологии, предусматривающие обработку ТМИ и принятие решений по управлению КА в ЦУП, обеспечивают оперативность принятия и реализации решений по управлению КА, но могут не обеспечивать требуемую полноту и достоверность диагностирования бортовой аппаратуры КА. В то же время оперативность и достоверность имеют важное значение в условиях нештатных ситуаций на борту КА, когда первичной задачей управления КА становится парирование нештатной ситуации – восстановление работоспособности КА.

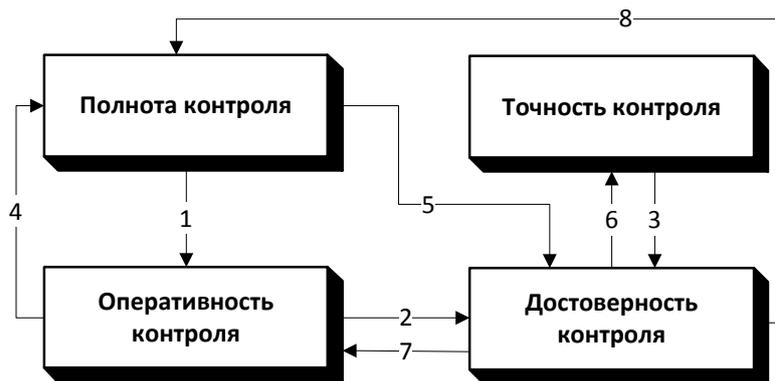


Рис. 2. Взаимосвязь составляющих достоверности технического диагностирования бортовой аппаратуры КА

Вместе с тем традиционно учитываемые при оценке технического состояния КА работоспособное и неработоспособное состояния дополняются частично работоспособным состоянием. В частично работоспособном состоянии КА правильно функционирует при выполнении отдельных функций и имеет место соответствие значений технических параметров, характеризующих выполнение этих функций, установленным требованиям. Это соответствует используемому в практике летной эксплуатации КА режиму применения КА с ограничениями.

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ДОСТОВЕРНОСТИ И ПОЛНОТЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С учетом отмеченных факторов в качестве наиболее важной характеристики процесса оперативного контроля технического состояния и технического диагностирования бортовых систем КА в секторе анализа ЦУП следует рассматривать достоверность. При этом с точки зрения принятия в ЦУП решений по управлению КА согласно принятой ТМИ при штатном функционировании бортовой аппаратуры существенное значение имеет взаимосвязь между достоверностью и полнотой контроля. Эти две составляющие достоверности технического диагностирования непротиворечивы: чем выше полнота контроля, тем выше достоверность контроля, однако полнота контроля не всегда может быть обеспечена. Покажем взаимосвязь полноты и достоверности контроля технического состояния КА.

Техническое диагностирование бортовой аппаратуры КА осуществляется по результатам многопараметрического контроля технического состояния КА по множеству ТМП, при этом КА выступает в качестве объекта контроля, а СИТО – в качестве системы контроля. Многопараметрический контроль является неполным, когда контролируются не все параметры объекта контроля, в рассматриваемом случае – не все ТМП КА. Возможны различные подходы к определению полноты контроля технического состояния при диагностировании технических систем [5, 6].

В простейшем случае полноту многопараметрического контроля можно определить как отношение числа контролируемых параметров n к общему числу параметров N , определяющих техническое состояние объекта контроля: $\Pi = n/N$. Во введенном таким образом показателе полноты контроля технического состояния могут быть учтены коэффициенты важности и надежности диагностируемых параметров. Полноту контроля в этом случае определяют в виде отношения (предполагается, что контролируемые параметры независимы)

$$\Pi = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i P_i}{\sum_{i=1}^N \varphi_i P_i}, \quad (1)$$

где φ_i – коэффициент важности i -го контролируемого параметра,

P_i – показатель безотказности элементов, оцениваемых i -м параметром, $i=1, \dots, N$.

Наиболее распространенным в настоящее время является подход к определению полноты контроля, при котором она рассматривается как отношение интенсивности отказов контролируемой части λ_k к интенсивности отказов всего объекта контроля λ : $\Pi = \lambda_k / \lambda$. К такому определению полноты контроля сводится ее определение в виде априорной вероятности обнаружения неисправности (отказа) [7]. Показатель полноты контроля в этом случае совпадает с вероятностной характеристикой процесса контроля – априорной вероятностью правильного заключения о неисправности объекта контроля. Если условно разделить объект контроля на контролируемую и неконтролируемую части и считать, что неконтролируемая часть исправна, то данный показатель можно выразить в виде $\Pi = Q_k / Q$, где Q_k – априорная вероятность неисправного состояния контролируемой части, Q – вероятность неисправного состояния всего объекта контроля. Для стандартной экспоненциальной модели потока отказов и высоконадежной бортовой аппаратуры КА на этапе нормальной эксплуатации выполняется

$$\Pi = \frac{Q_k}{Q} = \frac{1 - e^{-\lambda_k t}}{1 - e^{-\lambda t}} \approx \frac{\lambda_k}{\lambda}. \quad (2)$$

В обоих случаях – при определении полноты контроля по выражениям (1) и (2) – показатель Π изменяется в пределах $0 \leq \Pi \leq 1$. Предельные случаи соответствуют полному контролю ($\Pi = 1$) и отсутствию контроля ($\Pi = 0$).

Рекомендуемыми Государственным стандартом [8] показателями достоверности контроля технического состояния являются вероятности ошибок типа необнаруженного отказа $P_{НО}$ и ложного отказа $P_{ЛО}$ объекта контроля. Эти вероятности определяются априорной вероятностью исправного состояния объекта контроля $P = 1 - Q$ и вероятностями ошибок первого α и второго β рода по результатам контроля: $P_{НО} = (1 - P)\beta$, $P_{ЛО} = P\alpha$. Вероятность ошибки первого рода α есть вероятность того, что по результатам контроля исправного объекта контроля принимается решение об его неисправности (ложный отказ), вероятность ошибки второго рода β есть вероятность того, что по результатам контроля неисправного объекта контроля принимается решение об его исправности (необнаруженный отказ).

Правильное решение об исправном состоянии объекта контроля принимается тогда, когда и его контролируемая, и его неконтролируемая части исправны. Если полагать, что неисправности в контролируемой части определяются достоверно, то необнаруженный отказ будет иметь место при нахождении неисправности в неконтролируемой части. Вероятность такого результата контроля соответствует вероятности ошибки второго рода $\beta = Q_{НК} / Q$, где $Q_{НК}$ – априорная вероятность неисправного состояния неконтролируемой части объекта контроля. Вероятность ошибки второго рода β является наиболее критичным показателем достоверности контроля, поскольку характеризует наиболее неблагоприятный результат контроля – необнаруженный отказ. Поэтому при анализе взаимосвязи достоверности и полноты контроля технического состояния КА будем рассматривать вероятность ошибки второго рода как показатель достоверности контроля. В более общем случае используются показатели достоверности контроля, объединяющие вероятности ошибки первого и второго рода [5, 7].

Введем вероятности исправного состояния контролируемой $P_K = 1 - Q_K$ и неконтролируемой $P_{НК} = 1 - Q_{НК}$ частей. Для экспоненциальной модели потока отказов с учетом формулы (2) вероятность P_K определяется выражением

$$P_K = e^{-\lambda_k t} = e^{-\lambda \frac{\lambda_k}{\lambda} t} = e^{-\Pi \lambda t} = P^\Pi. \quad (3)$$

Для вероятностей P , P_K и $P_{НК}$ выполняется $P = P_K P_{НК}$, и исходя из выражения (3) для вероятности P_K можно получить выражение для вероятности $P_{НК}$:

$$P_{НК} = \frac{P}{P_K} = P^{1-\Pi}. \quad (4)$$

Тогда вероятность ошибки второго рода определяется выражением

$$\beta = \frac{Q_{НК}}{Q} = \frac{1 - P_{НК}}{1 - P} = \frac{1 - P^{1-\Pi}}{1 - P}. \quad (5)$$

При принятых допущениях выражение (5) определяет взаимосвязь между показателями достоверности контроля β , полноты контроля Π и надежности объекта контроля P . С увеличением полноты контроля Π и вероятности исправного состояния объекта контроля P вероятность ошибки второго рода β уменьшается и достоверность контроля увеличивается. При полном контроле $\Pi = 1$ и принятом предположении, что неисправности в контролируемой части определяются достоверно, ошибки второго рода отсутствуют: $\beta = 0$. В отсутствие контроля $\Pi = 0$ и всегда будет иметь место необнаруженный отказ: $\beta = 1$.

На рис. 3 показана определяемая выражением (5) зависимость вероятности ошибки второго рода β от полноты контроля Π при различных значениях априорной вероятности исправного состояния объекта контроля P . Кривая 1 соответствует $P = 0,5$, кривая 2 – $P = 0,7$, кривая 3 – $P = 0,9$. В области представляющих практический интерес значений вероятности исправного состояния объекта контроля P , близких к единице, ее влияние на зависимость β от Π незначительно, и для высоконадежной бортовой аппаратуры КА при использованном описании показателей достоверности и полноты контроля можно полагать: $\beta \approx 1 - \Pi$. На практике задаются требования к показателям достоверности контроля технического состояния и технического диагностирования КА, например, $\beta \leq \beta_{\min}$, где β_{\min} – минимально допустимое значение вероятности ошибки второго рода. Исходя из этого требования, должна выбираться требуемая полнота контроля $\Pi_{\text{треб}}$. При использованном описании показателей достоверности и полноты контроля $\Pi_{\text{треб}} \geq \beta_{\min}$ и при β_{\min} , близких к нулю, величина $\Pi_{\text{треб}}$ должна быть близка к единице.

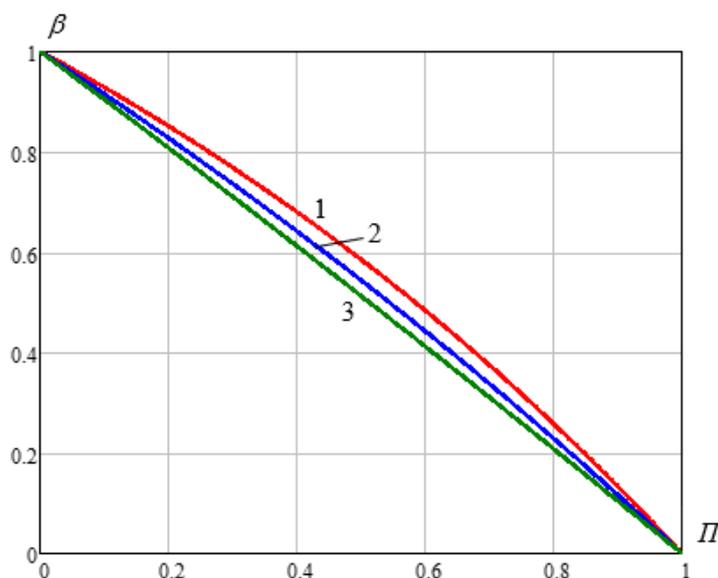


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки второго рода от полноты контроля

Полнота контроля технического состояния КА обеспечивается выбором набора контролируемых ТМП. При определении полноты контроля Π по выражению (2) высокая достоверность контроля достигается при выборе набора $n < N$ контролируемых ТМП, соответствующего

щих наименее надежным подсистемам (составным частям) объекта контроля, таким образом, чтобы выполнялось $\lambda_k \approx \lambda$. Поэтому для обеспечения достоверности технического контроля и технического диагностирования КА необходимы научно обоснованный выбор множества отдельных ТМП и обобщенных параметров, учитываемых при оперативном контроле технического состояния и техническом диагностировании бортовой аппаратуры КА, а также разработка соответствующих алгоритмов обработки ТМИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Надежное функционирование бортовой аппаратуры обеспечивает эффективное выполнение КА задач по целевому назначению, а при возникновении отказов и нештатных ситуаций на борту КА его применение по целевому назначению оказывается невозможно в течение времени, необходимого для технического диагностирования бортовой аппаратуры и парирования нештатных ситуаций. Для достижения высокой надежности функционирования КА необходимо развитие возможностей по выявлению и парированию отказов и нештатных ситуаций в бортовой аппаратуре КА средствами СИТО. Перенос выполнения операций по контролю технического состояния и техническому диагностированию бортовых систем КА в сектор анализа ЦУП направлен на повышение оперативности принятия в ЦУП решений по управлению КА, в том числе при возникновении нештатных ситуаций на борту КА.

Достоверность технического диагностирования бортовой аппаратуры КА в общем случае зависит от полноты, точности, достоверности и оперативности телеметрического контроля. В качестве наиболее важной характеристики процесса оперативного контроля технического состояния и технического диагностирования бортовых систем КА в секторе анализа ЦУП следует рассматривать достоверность телеметрического контроля, поскольку по его результатам принимаются решения по управлению КА в секторе управления ЦУП. При этом достоверность контроля тем выше, чем выше полнота контроля. Тем самым определяется важность научно обоснованного выбора множества контролируемых ТМП при контроле технического состояния и техническом диагностировании бортовой аппаратуры КА.

Список используемых источников

1. Современная телеметрия в теории и на практике / А. В. Назаров [и др.]. – СПб. : Наука и техника, 2007. – 672 с.
2. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса / Ю. С. Мануйлов [и др.]; под ред. Ю. С. Мануйлова. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
3. Методологические основы испытаний сложных технических систем / В. В. Васильев [и др.]; под ред. А. Ю. Потюпкина. – М. : ВА РВСН, 2012. – 245 с.
4. Автоматизированная обработка телеметрической информации / В. А. Чикуров [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 413 с.
5. *Дмитриев А. К., Мальцев П. А.* Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
6. *Викторова В. С., Степанянц А. С.* Проектный анализ контролепригодности технических систем (теория, методы расчета, программное обеспечение). – М. : ИПУ РАН, 2010. – 72 с.
7. *Северцев Н. А., Темнов В. Н.* Метрологическое обеспечение безопасности сложных технических систем. – М. : КУРС, 2019. – 352 с.
8. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2009. – 10 с.

А. В. Антропова;
В. В. Козлов,
доктор технических наук, профессор;
А. В. Лагун,
кандидат технических наук, доцент;
В. А. Харченко

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Рассмотрены теоретические положения математического моделирования оптимальных конструктивно-компоновочных решений агрегатов и систем технологического оборудования ракетно-космических комплексов. Предложены варианты синтеза технологического оборудования ракетно-космического комплекса, с выявлением системы предпочтения и построения на ее основе решающего правила выбора схемных решений для его агрегатов.

Ключевые слова: синтез, математические модели, конструктивно-компоновочные решения, агрегаты, технологическое оборудование, внешнее проектирование.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы для известных вариантов ракетно-космических комплексов (РКК) представлены неодинаковыми множествами операций. Каждая из технологических операций, как показывает опыт, может быть реализована несколькими способами, а каждый такой способ может найти свою индивидуальную конструктивную реализацию в различных агрегатах или системах технологического оборудования (ТО) РКК.

Процессы выбора и агрегирования технологических операций, выполняемые на вербальном уровне, приводят к снижению эффективности РКК по сравнению с ее значением при оптимальной организации процесса.

Проблема формирования облика оптимального ТО РКК должна быть основана на системном подходе. Использование системного подхода в качестве инструмента для анализа и синтеза ТО РКК неразрывно связано с оцениванием его эффективности как характеристики оптимальности.

Общая задача обоснования облика оптимального ТО РКК возникает, начиная с формирования тактико-технического задания (ТТЗ) на комплекс. При этом должны быть сформулированы исходные данные в виде требований к показателям. Решение общей задачи обоснования облика оптимального состава ТО РКК целесообразно начать с формирования концептуальной модели [1], которая определяет множество системных показателей и алгоритм их вычисления, а также систему предпочтений.

ПУТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Синтез оптимальных конструктивно-компоновочных решений агрегатов и систем ТО РКК является разделом внешнего проектирования РКК.

Принятие решений по формированию облика оптимальных конструкций и систем ТО РКК основано на использовании показателя эффективности как основного инструмента оценивания качества принимаемых решений. В общем случае задача оптимизации облика

ТО РКК должна строиться на основе векторного показателя эффективности. Такого класса задачи характерны тем, что в них нельзя утверждать, что то или иное решение действительно оптимально, поскольку невозможно строго математически доказать, что выбранное решение наилучшее [2].

Именно поэтому неизбежным этапом проектирования становится выявление системы предпочтения и построения на ее основе решающего правила.

В зависимости от способа формирования решающего правила методы решения задач делятся на несколько групп. К наиболее простой группе методов относятся такие, в которых происходит преобразование компонент векторного показателя в скалярный вид, который затем максимизируется. К такому решению нам удалось прийти, разрабатывая методологию обоснования облика РКК в целом [3].

При обосновании облика РКК система предпочтения должна содержать критерий оптимальности. Оптимальной считается стратегия использования активных средств, результат которой (показатель эффективности) достигает экстремального значения в направлении ресурсосбережения.

При проектировании ТО РКК каждый процесс должен быть оптимальным в определенном смысле. Так, например, для оценивания оптимальности можно оценивать эффективность или, в частных случаях, быстродействие, энергоемкость, точность и т. д. Такие задачи принято называть задачами управления состоянием динамической системы (механической, электрической и т. д.).

Полученный нами результат по формированию методологии внешнего проектирования ТО РКК удобнее рассмотреть на примере. Пусть требуется создать оптимальный объект, осуществляющий эффективный технологический процесс – движение агрегата ТО РКК (например, кабель-мачта, фермы обслуживания, отводимая опора пусковой установки и т. д.). Кинематическая схема такого объекта представлена на рис. 1, а его математическая модель имеет вид

$$J\ddot{\varphi} = -M_1(\dot{\varphi}) - M_2(\varphi) + M_{\text{упр}},$$

где $M_1, M_2, M_{\text{упр}}$ – моменты от действия весовой и ветровой нагрузок и момент управления движением соответственно;

J – момент инерции системы.

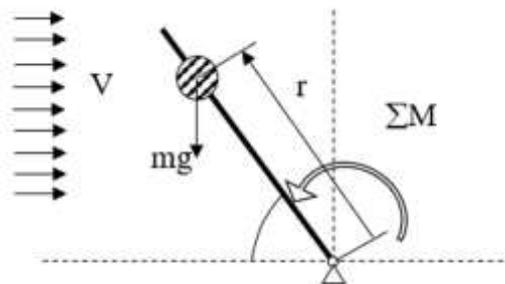


Рис. 1. Кинематическая схема кабель-мачты

Для данной модели существует множество решений, определяемых начальными условиями и видом функции $M_{\text{упр}}$. Суть задачи сводится к поиску варианта, который бы соответствовал эффективному решению движения такого механизма.

Решение задачи лежит на пути определения оптимальной траектории в n -мерном фазовом пространстве переменных состояния исследуемого объекта. В рассматриваемом примере $n = 3$, а переменными состояниями являются:

$$\varphi(t); \omega(t) = \frac{d\varphi}{dt}; \xi(t) = \frac{d\omega}{dt}.$$

Исходное уравнение движения можно переписать в виде системы уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \omega \\ \ddot{\varphi} = -A\dot{\varphi} - B\varphi + CM_{\text{упр}} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \dot{\varphi} = \omega \\ \dot{\omega} = -A\omega - B\varphi + CM_{\text{упр}} \end{cases},$$

где A , B , и C – некие константы. Введя обозначения $x_1(t) = \varphi$, $x_2(t) = \omega$ и $M_{\text{упр}} = C \cdot u(t)$, получим:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -Ax_2 - Bx_1 + Cu \end{cases} \quad (1)$$

или в общем виде

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_n), i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

Общность исходной математической модели, рассматриваемой в этом примере, позволяет записывать все уравнения движения теоретической механики в виде системы (2). Другими словами, все движения агрегатов ТО РКК могут быть описаны системой уравнений (2).

Основной смысл решения рассматриваемого класса задач сводится к отысканию оптимального (эффективного) управления. В классической теории оптимальных систем это условие соответствует поиску минимума интеграла:

$$K_F(u, x) = \int_{t_0}^{t_k} f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r) dt, \quad (3)$$

в котором функция $u(t)$ удовлетворяет всем назначенным (имеющимся) ограничениям, обеспечивает достижение исследуемым объектом цели управления и доставляет минимальное значение указанному выше интегралу. Помимо оценивающего критерия-функционала $K_F(u, x)$, как правило, задаются ограничения вдоль траектории движения синтезируемого объекта $(x, u, t) \in G$ и краевые условия $(x, t_0) \in E_0$, $(x, T) \in E_T$.

Физический смысл минимизируемого функционала, произвольное и определяется автором задачи. В то же время, его математическая запись ограничена и связана с дифференцируемостью функции f_0 .

Рассматриваемая нами общность задач соответствует задачам Майера, где максимизируется значение показателя эффективности, т. е. минимизируется функционал

$$K_F(x, u) = \int_{t_0}^{t_k} \frac{dt}{\Pi_{\text{эф}}},$$

где $\Pi_{\text{эф}}$ – показатель эффективности (безразмерная величина, $0 \leq \Pi_{\text{эф}} \leq 1$).

При использовании принципа Понтрягина поиск оптимального процесса содержит поиск некой присоединенной функции $\psi(t)$, являющейся решением присоединенной системы уравнений с соответствующими граничными условиями, и такой, что почти для всех $t \in [t_0, t_k]$ выполняется условие

$$\max_{u \in U} H(\psi(t), x(t), u, t) = H(\psi(t), x(t), u(t), t),$$

где H – функция Гамильтона;

$x(t)$ – функция состояния движущегося объекта;

$u(t)$ – функция управления (влияния) движением рассматриваемого объекта.

Оптимальность процесса при постановке задачи задается минимизацией критерия-функционала. Обычно критерий-функционал (3) трактуется как конечное значение $x_0(t_k)$ дополнительной переменной состояния $x_0(t)$, удовлетворяющей уравнению

$$\frac{dx_0}{dt} = f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r)$$

и начальному условию $x_0(t_0) = 0$.

Необходимое условие оптимальности управления, выражаемое принципом максимума Понтрягина, включает определение $n + 1$ сопряженных переменных $\Psi_0(t), \Psi_1(t), \dots, \Psi_n(t)$ как решение $(n + 1)$ дифференциальных сопряженных уравнений первого порядка:

$$\frac{d\Psi_i}{dt} = \frac{\partial f_0}{\partial x_i} - \sum_{k=0}^n \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \Psi_k \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n; t_0 < t < t_k),$$

причем $\Psi_0(t) = \text{const} \leq 0$.

В этом случае минимизировать соотношение (3) и получить оптимальное управление процесса возможно при выполнении условия

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n; \Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n; u_1, u_2, \dots, u_r) = -f_0 + \sum_{i=0}^n \Psi_i f_i$$

Для каждого t между t_0 и t_k оптимальное управление определяется условием

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0.$$

Таким образом, решение поставленной задачи сводится к программированию управляющей переменной $u = u(t)$ (по ранее рассмотренному частному примеру – $M_{\text{упр}}$), так чтобы минимизировать функцию f_0 ($f_0 = 1/\Pi_{\text{эф}}$) или максимизировать значение показателя эффективности $\Pi_{\text{эф}}$. Для этого случая

$$K_F(x, u) = \int_{t_0}^{t_k} f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r) dt = \int_{t_0}^{t_k} dt = t_k$$

или $f_0 \equiv 1$, что соответствует задаче о быстродействии.

Так как многообразие начальных и конечных состояний зависит от t_0 и t_k , то в дополнение к рассмотренной ранее системе уравнений (1) можно положить:

$$x_3 = t, \quad \frac{dx_3}{dt} = 1, \quad x_3(t_0) = t_0, \quad x_3(t_k) = t_k,$$

т. е. рассматриваемой системой является

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2, \\ \frac{dx_2}{dt} = -Ax_2 - Bx_1 + Cu, \\ \frac{dx_3}{dt} = 1. \end{cases}$$

Отсюда следует, что выражение для гамильтониана имеет вид

$$H = -1 + \Psi_1 x_2 + \Psi_2 (-Ax_2 - Cu) + \Psi_3.$$

Сопряженные уравнения находятся следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_1}{dt} &= 0 - \left(\psi_1 \frac{\partial}{\partial x_1} x_2 + \psi_2 \frac{\partial}{\partial x_1} (-Ax_2 - Cu) + \psi_3 \frac{\partial}{\partial x_1} 1 \right) = 0; \\ \frac{d\psi_2}{dt} &= 0 - \left(\psi_1 \frac{\partial}{\partial x_2} x_2 + \psi_2 \frac{\partial}{\partial x_2} (-Ax_2 - Cu) + \psi_3 \frac{\partial}{\partial x_2} 1 \right) = -\psi_1 - A\psi_2; \\ \frac{d\psi_3}{dt} &= 0 - \left(\psi_1 \frac{\partial}{\partial x_3} x_2 + \psi_2 \frac{\partial}{\partial x_3} (-Ax_2 - Cu) + \psi_3 \frac{\partial}{\partial x_3} 1 \right) = 0,\end{aligned}$$

тогда система уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{\psi}_1 &= 0, \\ \dot{\psi}_2 &= -\psi_1 - A\psi_2, \\ \dot{\psi}_3 &= 0,\end{aligned}$$

с учетом того, что $\psi_1(t_0) = \psi_2(t_0) = \psi_3(t_0) = 0$, имеет следующие решения:

$$\begin{aligned}\psi_1 &= \text{const} = 0, \\ \psi_2 &= e^{-At}, \\ \psi_3 &= \text{const} = 0.\end{aligned}$$

Следовательно, оптимальное управление находится из условия

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial}{\partial u} [-1 + e^{-At} (-Ax_2 - Cu)] = -Ce^{-At} = 0$$

или в силу того, что $e^{-At} \neq 0$, должно выполняться условие $C = 0$.

Такой результат, согласно исходному уравнению

$$\ddot{\phi} = -A\dot{\phi} - B\phi + CM_{\text{упр}},$$

свидетельствует о том, что оптимальным, с точки зрения эффективности, следует считать такой процесс, где управление отсутствует. Что позволяет сформулировать оптимальность всех механических движений агрегатов ТО РКК как принцип самоорганизованности – отсутствия дополнительных, внешних для целевого объекта воздействий. Для рассмотренного выше примера (см. рис. 1) это соответствует выбору схемы, представленной на рис. 2.

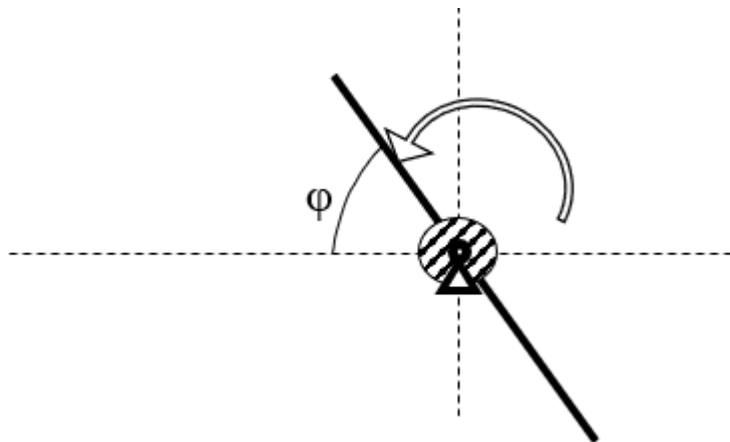


Рис. 2. Кинематическая схема кабель-мачты с оптимальным управлением

Полученный вывод соответствует принципу наименьшего действия в механике.

Для рассматриваемых в статье процессов на отрезке $[t_0, t_k]$ следует добиться выполнения условия

$$K_F = \int_{t_0}^{t_k} (T - U) dt = \int_{t_0}^{t_k} L dt = 0,$$

где T , U , L – кинетическая, потенциальная энергия и функция Лагранжа соответственно. Для рассматриваемого здесь примера:

$$T = \frac{1}{2} J (\dot{\varphi})^2, \quad U = -\frac{1}{2} mgr \sin \varphi.$$

Согласно принципу наименьшего действия уравнение движения системы для функционала K_F можно записать в виде

$$J\ddot{\varphi} - mgr \sin \varphi = 0$$

или, иными словами, в уравнении движения отсутствует правая часть, являющаяся, по сути, управляющей функцией.

Таким образом, для осуществления намеченного движения не требуется дополнительное управляющее воздействие. Его присутствие лишь увеличит ресурсоемкость системы. Действительно, для системы, описываемой уравнением без правой части типа:

$$m\ddot{x} = -nx - k\dot{x} \quad \text{или} \quad a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = 0,$$

как известно, возможны следующие варианты изменения искомого параметра x только за счет изменения параметров a , b и c объекта управления (рис. 3).

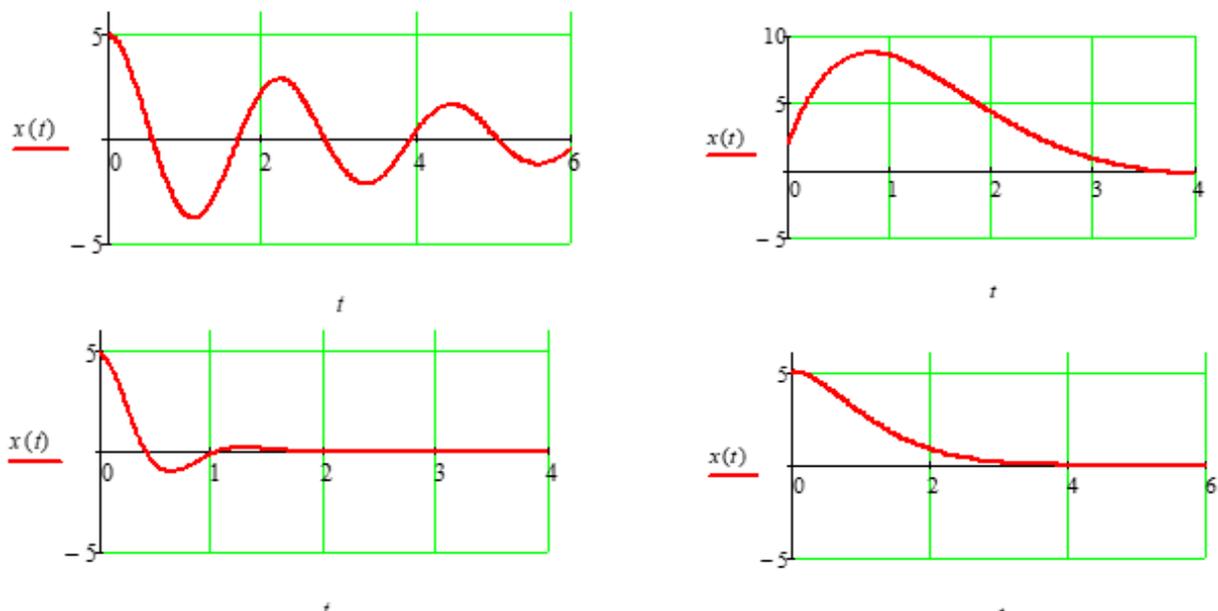


Рис. 3. Результаты функционирования модели при разных параметрах a , b и c

Как видно из графиков (рис. 3), только варьированием параметров объекта управления возможно достичь управляемости – перехода из произвольного начального состояния x_0 в конечное состояние x_k на конечном, заданном интервале времени $(t_0, t_k]$ без специального управляющего воздействия. Более того, при назначении управляющего воздействия $[u(t)]$ исходная система

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = u(t)$$

с учетом введения новой переменной может иметь вид

$$a_1 \ddot{\xi} + b_1 \dot{\xi} + c_1 \xi = 0,$$

что само по себе ставит вопрос об управляемости управления, и тем самым делает задачу бесконечной, как в смысле синтеза объекта, так и ресурсоемкости.

Однако в том случае, когда принято решение (например, лицом, принимающим решение) о создании кинематической схемы, показанной на рис. 4, управление может быть оптимизировано (хотя оно в принципе неэффективное).

Для этого случая оптимизируется выбранное решение – момент создаваемый демпфером (дополнительным элементом целевого объекта – системой управления).

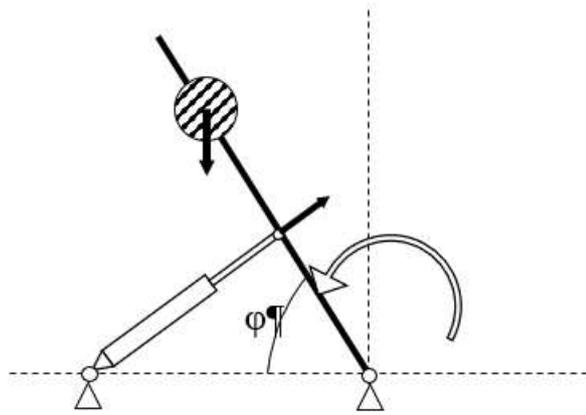


Рис. 4. Кинематическая схема кабель-мачты с демпфером

Поскольку присоединенные переменные ψ_i могут быть интерпретированы как обобщенные моменты, а функция H имеет размерность энергии, то в качестве минимизируемого критерия-функционала можно принять

$$K_F(x, u) = \int_{t_0}^{t_k} f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r) dt = \int_{t_0}^{t_k} u^2 dt.$$

В качестве подинтегрального выражения здесь представлен квадрат управляющей функции, поскольку в выражениях для энергии также используется квадрат скорости:

$$T = \frac{m}{2} v^2 \left(\frac{J}{2} \omega^2 \right).$$

Тогда, повторяя выполненную ранее последовательность расчета, можно получить:

$$x_3 = t, \frac{dx_3}{dt} = 1, x_3(t_0) = t_0, x_3(t_k) = t_k;$$

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2; \frac{dx_2}{dt} = -Ax_2 - Bx_1 + Cu; \frac{dx_3}{dt} = 1;$$

$$H = -u^2 + \psi_1 x_2 + \psi_2 (-Ax_2 - Cu) + \psi_3;$$

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \frac{d\psi_3}{dt} = 0; \frac{d\psi_2}{dt} = -\psi_1 - A\psi_2;$$

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \frac{\partial}{\partial u} \left[-u^2 + \psi_1 x_2 + (-Ax_2 - Cu) \right] = -\frac{1}{2} u - Ce^{-At} = 0,$$

откуда оптимальное решение для назначенной схемы по назначенному критерию определяется выражением

$$u = -2Ce^{-At} = C_1e^{-At}.$$

Поскольку для гидроцилиндра системы подъема (опускания) получен оптимальный закон управления $u = u(t)$, то следующей задачей является синтез гидравлической системы (системы управления управляющего устройства целевого объекта), обеспечивающей это движение, а также геометрии такого механизма. В результате проектируется не сам объект, а его система управления, в то время, когда потенциальные возможности целевого объекта остаются не исследованными и не оптимизированными.

Отсюда следует, что при проектировании рациональным является такой подход, при котором оптимальное решение следует искать не за счет создания систем его управления, а путем совершенствования схемы целевого объекта. Общность выражения (2) показывает, что такой подход возможен и должен выполняться еще на концептуальном уровне принятия решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для формирования математических моделей оптимальных процессов функционирования агрегатов ТО РКК приемлемы следующие положения:

- 1) системная концепция управляющей системы, для которой, под управляющей системой понимается объект, оказывающий целенаправленное воздействие на другой объект, называемый управляемым, для перевода последнего в требуемое состояние;
- 2) концепция минимальной реализации пространств состояний создаваемого объекта;
- 3) принцип механической доминанты, а также принципы Гамильтона и самоорганизации;
- 4) основные свойства, которыми должны обладать агрегаты ТО РКК:
 - устойчивость как способность желаемого движения и сохранения назначенных состояний;
 - управляемость как минимальная ресурсоемкость для достижения поставленной задачи.

Список используемых источников

1. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / ред. совет: В. С. Авдусевский (пред.) [и др.]. – М. : Машиностроение, 1987.
2. Вычислительные методы выбора оптимальных проектных решений / В. С. Михайлович [и др.]. – К. : Наук. думка, 1977. – 178 с.
3. Козлов В. В. Основы проектирования ракетно-космических комплексов. Системотехника РКК для инженеров механиков. – СПб. : ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 1999. – 365 с.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М. : Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 462 с.

Е. В. Басотин,
доктор технических наук, доцент;
Р. М. Вивчарь,
кандидат технических наук;
А. И. Птушкин,
кандидат технических наук, профессор

ПРОАКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

В данной статье рассматриваются вопросы повышения эффективности управления техническим состоянием оборудования критически важных объектов за счет применения проактивных стратегий управления. Проанализирована эволюция трех поколений проактивных стратегий управления: 1-го поколения – превентивной, 2-го поколения – предиктивной и 3-го поколения, отличающегося от первых двух тем, что она не только упреждает наступление неблагоприятных событий в настоящем, но и обеспечивает постепенное снижение частоты повторения подобных событий, вплоть до их полного исчезновения в будущем. Проактивную стратегию 3-го поколения предложено назвать суперактивной. Показано, что именно эта стратегия является наиболее востребованной для управления техническим состоянием оборудования критически важных объектов и в сочетании с другими стратегиями управления позволяет получить существенные выгоды от их применения. Приведен перечень необходимых мероприятий, обеспечивающих эффективность их применения.

Ключевые слова: проактивность, стратегии, проактивное управление, превентивное управление, предиктивное управление, суперактивное управление, критически важный объект, техническое состояние.

ВВЕДЕНИЕ

В начале XXI века термин «проактивность» стал очень популярным в научной литературе, посвященной различным областям человеческой деятельности – поведению человека, в частности, управлению персоналом; сложными техническими и организационно-техническими объектами в космической отрасли, атомной энергетике; транспортно-логистическими системами; ИТ-инфраструктурой и многими другими критически важными объектами (КВО), качество функционирования которых уже не отвечает возросшим требованиям их заказчиков. При этом применение указанного термина в технической сфере сопровождается широкой его трактовкой – от упреждения неблагоприятных событий до требования недопустимости их появления.

Кроме того, в настоящее время до сих пор в научных работах по теории и практике управления рассматриваются вопросы проактивного управления, которые ограничиваются только упреждением наступления неблагоприятных событий, а причины их появления либо вообще не рассматриваются, либо анализируются исключительно причины первого уровня, которые непосредственно вызывают проблему и устранение которых решает ее только в настоящем. В работах, посвященных анализу первопричин наступления таких событий, не уделяется должного внимания организации работ по их выявлению и ликвидации.

В отечественной научно-технической литературе вопросы сущности современного представления о проактивности и его гармонизации с трактовкой, принятой в психологии, пока не рассматриваются вообще. Объем работ, который требуется выполнить для того, чтобы внедрить на практике проактивное управление, отвечающее по своему содержанию современным требованиям, также пока не рассматривается.

Целями этой публикации являются:

– привлечение внимания научно-технической общественности к обсуждению вопросов совершенствования качества управления КВО за счет внедрения в практику их эксплуатации проактивных стратегий управления;

– уточнение терминологической базы в области проактивного управления в соответствии с современными взглядами на сущность понятия «проактивность».

ЭВОЛЮЦИЯ ПОНЯТИЙ «ПРОАКТИВНОСТЬ» И «ПРОАКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ»

Термин «проактивность» носит обобщающий характер для группы упреждающих стратегий управления персоналом и техникой, которые развиваются начиная с прошлого века и до настоящего времени. При этом изменяются и его трактовки.

В англо-русских словарях понятие *proactive* переводится как «профилактический, предупреждающий, упреждающий (действия предупредительного характера)» [1].

В Толковом словаре английского языка [2] рассматриваемое понятие интерпретируется примерно так же: как «действующий заранее; принимающий меры предосторожности» или «принимающий превентивные меры, предпринимая действия заранее», а в другом словаре [3] – как «действие в предвидении будущих проблем, потребностей или изменений», т. е. на основе выполненного прогноза.

Первые две трактовки понятия «проактивности» соответствуют хорошо известной плано-предупредительной системе управления техническим состоянием (системе технического обслуживания) разнообразной техники, например, автомобиля, которое проводится независимо от того, в каком состоянии в действительности находится техника. Третья трактовка проактивности предусматривает определение момента проведения управленческого вмешательства на основе прогноза момента возможного возникновения неблагоприятной ситуации, связанной с изменением технического состояния управляемого объекта. Этот прогноз делается по результатам обработки данных постоянного или периодического контроля технического состояния.

Такие стратегии управления техническим состоянием оборудования посредством их технического обслуживания в прошлом веке назывались на Западе превентивными (проактивными 1-го поколения) и предиктивными (проактивными 2-го поколения) [4], а в России – плано-предупредительными и управлением на основе прогнозных оценок фактического технического состояния [5] соответственно. Обе эти упреждающие стратегии основывались на принципе «лучше раньше, чем позже». В первом случае, как правило, – существенно раньше, что приводило к повышенному расходу запасных частей и материалов, во втором – непосредственно перед отказом, что обеспечивало экономичность эксплуатации технического устройства, если стоимость создания и эксплуатации системы контроля его состояния меньше стоимости восстановления его работоспособности.

В XXI веке взгляды на трактовку понятия проактивности в управлении техническими системами существенно изменились. Возможно, что это произошло под влиянием интерпретации понятия проактивности в психологии.

В психологии во второй половине XX века «спусковым крючком» для начала активных работ по изучению проактивного поведения человека послужила работа Эмиля Франкла [6], посвященная проблеме осмысления человеческого бытия. Стремление к поиску и реализации человеком смысла своей жизни Франкл рассматривает как врожденную способность, присущую всем людям и являющуюся основным двигателем поведения и развития личности. Однако далеко не каждый человек способен воспользоваться этой врожденной способностью. Большое количество людей ведут пассивный образ жизни, ориентируясь на прошлые привычки, предубеждения и текущие обстоятельства. Но есть и такие люди, которые, найдя в окружающем их мире смысл своей жизни и осознав его, строят свое будущее и, прокладывая дорогу к нему, управляют обстоятельствами, встречающимися на этом пути, используя позитивные обстоятельства и устраняя негативные (или ослабляя их воздействие), беря на себя ответственность за выполняемые действия. Высокоэффективные люди признают

за собой такую ответственность. Они не объясняют свое поведение условиями, обстоятельствами и трудными ситуациями. Их поведение есть продукт их собственного сознательного выбора, базирующегося на необходимости достижения поставленной перед ними цели, а не продукт окружающих условий, основанный на чувствах. Выработка соответствующего менталитета у персонала должна стать одной из важных задач системы управления персоналом. Поведение таких людей в современной психологии и называется проактивным. Профессор Томас Бэйтмен, специализирующийся в области организационного управления, называет проактивность суперспособностью человека, которую он должен развивать всю свою жизнь [7].

На сегодняшний день в психологии проактивность человека трактуется как его способность выявлять будущие проблемы и возможности для их преодоления (устранения первопричин для их возникновения), на основе которых он обеспечивает гибкое управление своим состоянием, приводящее в будущем к желаемому результату путем как «реакции на определенные обстоятельства, так и путем формирования самих обстоятельств» [8]. Следует заметить, что проактивность всегда направлена на достижение долгосрочных (стратегических) целей (например, жизни или достаточно большого ее периода) и требует сохранения стратегического видения на протяжении всего процесса внесения в траекторию движения к цели тактических изменений, диктуемых обстоятельствами [9].

Идея управления движением к желаемому будущему была перенесена из психологии в техническую сферу, в которой для будущего критически важных объектов (КВО), да и для многих других объектов, применение стратегии проактивного управления, которая обеспечивает только упреждение возникновения неблагоприятных событий, уже не является приемлемой, так как простое упреждение устранения проблемы не снижает частоты их появления в будущем и требует времени для ее устранения, а для многих объектов даже малые перерывы в работе приводят к нежелательным последствиям. Обеспечение снижения частоты появления проблем и в конечном счете их полная ликвидация возможны только за счет заблаговременного устранения первопричин их возникновения. Поэтому процессы выявления и устранения первопричин прогнозируемых проблем как в технической, так и в организационной сферах стали одной из важных отличительных черт современного этапа развития понимания проактивности.

Таким образом, в арсенале стратегий проактивного управления техническим состоянием КВО появилась еще одна проактивная стратегия, уже 3-го поколения. Эту стратегию, в соответствии с трактовкой проактивности в современной психологии как суперспособности, предлагается назвать *суперактивной*. Возможности повышения эффективности управления КВО с помощью этой стратегии существенно превышают возможности предшествующих ей проактивных стратегий, но отнюдь не делают их ненужными.

Стратегии суперактивного управления, соответствующей изложенной современной трактовке проактивности, можно дать следующее определение.

Суперактивное управление – это управление траекторией изменения состояния объекта управления в процессе достижения цели его создания путем заблаговременного выявления и устранения первопричин прогнозируемых проблем. При этом цель создания должна иметь амбициозный характер, даже если она достижима только теоретически. Например, целью суперактивного управления не должно быть только упреждение наступления неблагоприятного события. Его целью должно быть исключение его повторения в будущем.

Комплекс стратегий управления, включающий в свой состав реактивную стратегию и три вида проактивных стратегий, представлен на рис. 1.

Разделение стратегий управления на реактивную и проактивную обусловлено наличием или отсутствием в момент выработки управляющих решений негативного события (НС), под которым, например, может пониматься нарушение нормального функционирования оборудования. В случае, если выработка управляющих решений происходит после появления НС, имеет место реактивная или восстановительная стратегия управления.

Реактивную стратегию наиболее целесообразно использовать для управления объектами, при функционировании которых появление НС не приводит к серьезным последствиям. Для КВО такая стратегия управления может быть использована только для их некритичных элементов.

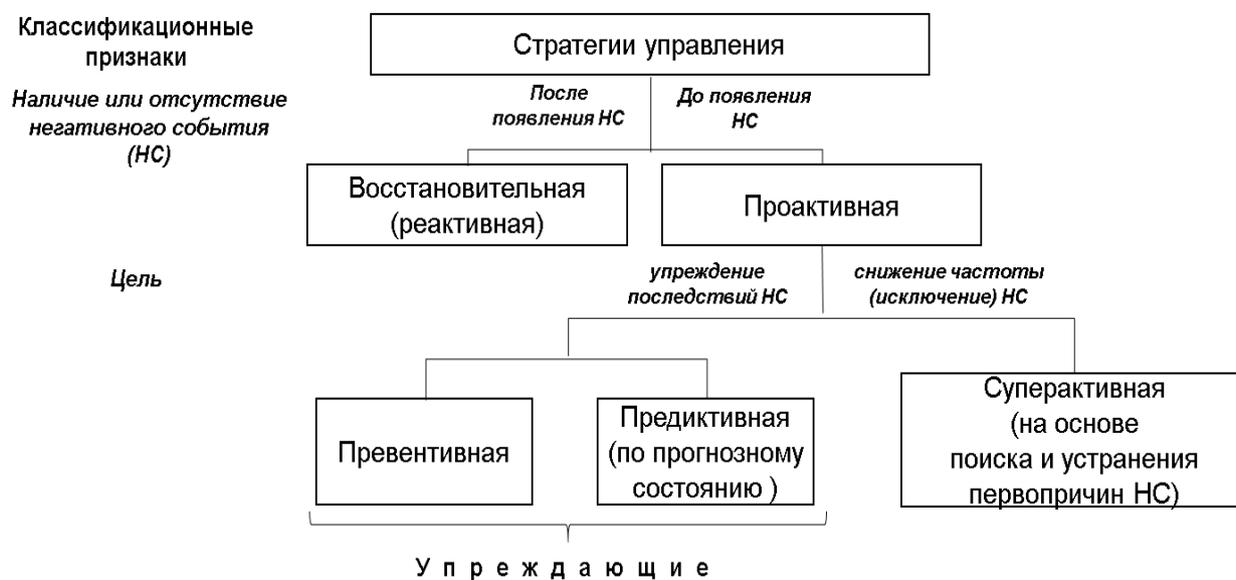


Рис. 1. Классификация стратегий управления техническим состоянием оборудования КВО

Проактивная стратегия управления заключается в том, что выработка управляющих решений происходит еще до появления НС и в зависимости от цели, на которую они направлены, может подразделяться следующим образом :

- превентивная и предиктивная, если цель управляющих решений направлена на упреждение последствий НС;
- суперактивная, если цель управляющих решений направлена на снижение (вплоть до полного исключения) частоты такого НС.

Проактивное управление всегда сопряжено с риском из-за сложностей долгосрочного прогнозирования. Оно может оказаться неуместным, или его выполнение может обернуться дорогостоящим провалом. Поэтому проактивные управленческие решения, также как и другие решения, принимаемые в условиях неопределенности, должны сопровождаться оценкой показателей риска их выполнения.

Выбор той или иной стратегии управления определяется свойствами составных частей объекта управления и наличием возможностей для их применения. Одним из самых распространенных управляющих воздействий на объекты эксплуатации являются мероприятия их технического обслуживания, программы которых до начала XXI века характеризовались следующим соотношением применяемых стратегий: менее 10% – реактивного, от 25 до 35% – превентивного и от 45 до 55% – предиктивного обслуживания [10].

В НАСА в данный момент используется несколько иная, по отношению к приведенной выше, классификация стратегий технического обслуживания. Если в работе [4] 1997 года, как уже отмечалось ранее, превентивные и предиктивные стратегии технического обслуживания назывались соответственно *proactive 1* и *proactive 2*, то в Руководстве [11] 2008 года превентивные и предиктивные стратегии уже не называются проактивными, а проактивным техническим обслуживанием называется только техническое обслуживание, названное в данной статье суперактивным.

Рассмотрим более подробно основные черты суперактивного управления.

СУПЕРАКТИВНАЯ СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ – ПРОАКТИВНАЯ СТРАТЕГИЯ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Для внедрения суперактивной стратегии управления техническим состоянием оборудования КВО в практику его эксплуатации необходимо выполнить ряд условий, обеспечивающих достижение ее цели.

Прежде всего, необходимо четко сформулировать эту цель. Конечная цель управления техническим состоянием оборудования КВО должна быть стратегической и амбициозной. Например, она должна предусматривать полное исключение отказов оборудования или наступления других неблагоприятных событий, приводящих к прекращению функционирования КВО, появлению угрозы безопасности обслуживающего персонала или безопасности населения. Перерывы в функционировании КВО сейчас обусловлены необходимостью проведения технических обслуживаний (ТО) оборудования, предусматривающих применение таких стратегий управления, как реактивной, превентивной и предиктивной. Применение предиктивной стратегии управления позволяет сократить затраты времени на проведение ТО, но не позволяет избавиться от него полностью, так как не предусматривает устранение первопричин упреждаемых неблагоприятных событий. Только суперактивная стратегия управления, предусматривающая последовательное устранение названных первопричин, способна привести к существенному сокращению частоты появления неблагоприятных событий и, возможно, к их полному исключению (рис. 2).

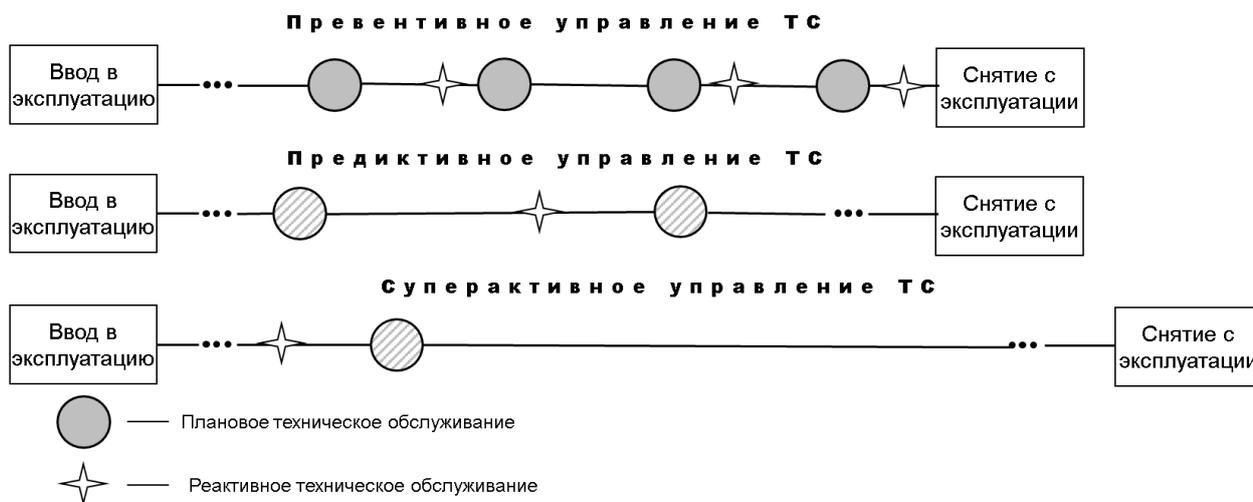


Рис. 2. Сравнительная характеристика возможностей влияния на частоту появления неблагоприятных событий различных стратегий управления ТС

Что же необходимо сделать, чтобы выявить первопричины появления неблагоприятных событий и исключить их появление в дальнейшем? А сделать нужно довольно много.

Во-первых, эксплуатационный управляющий персонал и персонал, занятый на других стадиях жизненного цикла (ЖЦ), должен быть обеспечен научно-методическими материалами, необходимыми для анализа иерархии первопричин возникающих проблем. На сегодняшний день ограничиваются анализом первопричин первого уровня, которые непосредственно вызывают проблему и устранение которых решает проблему только в настоящем. Для исключения повторного возникновения подобной проблемы в будущем необходимо устранить причины более низкого уровня, цепочка которых вызывает причину первого уровня. Математический аппарат для анализа первопричин довольно обширен. Он включает в себя методы деревьев отказов, нейронные, байесовские и марковские логические сети, сети Петри и др.

Во-вторых, для обеспечения быстрого обмена между участниками всех стадий ЖЦ оборудования информацией о необходимости изменения в его конструкции или эксплуатационных процессах в интересах устранения первопричин ниже первого уровня необходимо использование возможностей системы управления ЖЦ оборудования КВО (рис. 3)

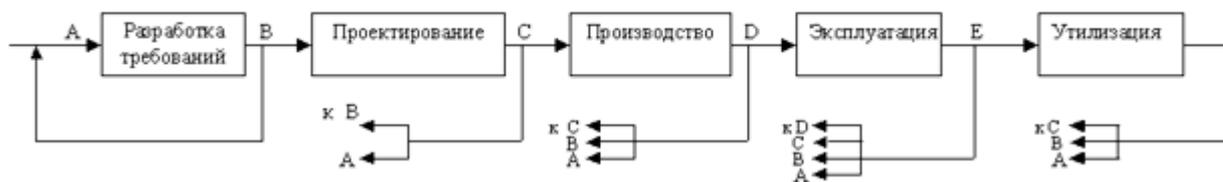


Рис. 3. Схема оперативного обмена информацией между участниками ЖЦ оборудования КВО

В-третьих, всем участникам ЖЦ оборудования КВО (управленцам и исполнителям) необходимо прививать менталитет «устранять проблему навсегда».

В-четвертых, поведение персонала (лиц, принимающих решения, и исполнителей) должно рассматриваться в двух аспектах: с точки зрения его способности предвидеть будущие проблемы и управлять обстоятельствами, которые могут их вызвать, а также с точки зрения готовности нести ответственность за принятое решение или выполненную работу.

В-пятых, содержание прогноза изменения технического состояния оборудования КВО должно обеспечить получение знаний о том, что произойдет не только с контролируемым оборудованием, но и с другими, сопряженными с ним компонентами системы, о возможных причинах этого и какие действия необходимо будет выполнить, чтобы исключить в будущем и их отказ.

Применение суперактивного управления техническим состоянием оборудования КВО позволит получить следующие выгоды:

- существенное увеличение срока полезного использования оборудования и сокращение эксплуатационных затрат;
- экономию материальных ресурсов, улучшение экологии и показателей безопасности;
- снижение потребления энергии и минимизацию отходов.

Стратегия проактивного управления 3-го поколения уже успешно применяется в НАСА для управления техническим обслуживанием оборудования объектов космической инфраструктуры [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы.

1. Ключевыми элементами суперактивного управления являются:
 - определение конечной цели – желаемого будущего;
 - анализ и устранение первопричин возникновения неблагоприятных ситуаций с целью ликвидации возможности их возникновения в будущем;
 - привитие лицам, принимающим решения, и исполнителям менталитета «устранять проблему навсегда».
2. Суперактивное управление носит стратегический характер и процессы его внедрения и применения на ранних этапах эксплуатации являются дорогостоящими. Основной областью его применения должны стать критически важные объекты или особо важные составные части других сложных организационно-технических объектов с большим сроком службы, что обеспечит компенсацию амортизационных расходов.
3. Суперактивное управление является результатом конвергенции прогноза и плана (траектории) достижения прогнозируемого будущего, который базируется на реальных знаниях

о препятствиях на этом пути, которыми являются первопричины возникновения неблагоприятных ситуаций.

4. Суперактивное управление имеет некоторые общие черты с терминальным управлением и методологией *foresight*.

5. Суперактивное управление не заменяет существующие стратегии управления, а дополняет арсенал этих стратегий. Для сложных систем целесообразно применение оптимальной смеси этих стратегий.

6. Проактивность также важна для организации успешного самоуправления в СЭ, формирования лидерских качеств управленческого персонала и даже для решения глобальных проблем общества.

Список используемых источников

1. Англо-русский словарь общей лексики. – ООО «Контент ИИ», 2022. – 1150 с.
2. Толковый словарь английского языка / под ред. А. Хорнби, Э. Гейтенби, Х. Уэйкфилд. – Изд., доп. и перераб. – М. : СИГМА-Пресс, 1996. – 947 с.
3. Incorporated Merriam-Webster's Vocabulary Builder. – Second Edition. – Merriam-Webster, 2010. – 1890 p.
4. *Moubray J.* Reliability-centered maintenance. – 2nd ed. // Industrial Press Inc. – New York, 1997. – 440 p.
5. *Перминов А. Н.* Управление наземной космической инфраструктурой на основе мониторинга ее состояния : моногр. – СПб., 2005. – 320 с.
6. *Франкл В.* Человек в поисках смысла : сб. : пер. с англ. и нем. / общ. ред. Л. Я. Гозмана и Д. А. Леонтьева; вступ. ст. Д. А. Леонтьева. – М. : Прогресс, 1990. – 368 с.
7. *Thomas S. Bateman* Why Proactivity Is the Superpower You Can and Should Develop. – URL: psychologytoday.com/us/blog/getting-proactive/201811 (дата обращения: 12.10.2024).
8. *Кови С.* Семь навыков высокоэффективных людей : Мощные инструменты развития личности. – М. : Альпина Паблишер, 2012. – 314 с.
9. *Bateman T.* Proactivity. – URL: practicalwisdom.buzzsprout.com (дата обращения: 12.10.2024).
10. Proactive Operation – Asset Management. – URL: maintworld.com/Asset-Management/Proactive (дата обращения: 12.10.2024).
11. RCM GUIDE. RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE GUIDE // For Facilities and Collateral Equipment / National Aeronautics and Space Administration. – September 2008.

А. А. Бянкин,
кандидат технических наук, доцент;
В. Н. Ломтев;
А. И. Лоскутов,
доктор технических наук, профессор;
В. Г. Перле;
Д. Б. Семенов,
кандидат технических наук

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ АВТОНОМНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Представлена формализация процессов структурной идентификации автономных динамических объектов с использованием интеллектуальной обработки диагностической информации в экспертных системах поддержки принятия решений реального времени. Предлагается модель процесса интеллектуальной обработки информации о состоянии объекта и среды с целью выбора соответствующего формализованного способа описания функционирования объекта для решения целевой задачи (испытания или управления). Сформирована структура экспертной системы поддержки принятия решений при структурной идентификации автономных динамических объектов.

Ключевые слова: структурная идентификация, интеллектуальная обработка информации, экспертные системы, автономные динамические объекты, диагностическая информация.

ВВЕДЕНИЕ

На всех этапах жизненного цикла автономных динамических объектов (АДО) различных типов, начиная с разработки и заканчивая завершением срока их активного существования, возникает необходимость в оценке степени соответствия функционирования бортовых систем ожиданиям относительно их правильного поведения [1, 2]. В основу решения данной задачи положен принцип сравнения параметров контролируемого объекта с эталонными (модельными) значениями, получаемыми при проведении идентификации АДО на этапах разработки, создания и применения по назначению. Для реализации указанного процесса создаются системы контроля вида технического состояния проверяемых объектов с возможностью локализации неисправностей и, соответственно, реконфигурации (восстановления) систем. В настоящее время развитость теории идентификации и технического диагностирования систем динамических объектов позволяет решать задачи испытаний в условиях классов обнаруживаемых неисправностей в рамках синтезируемой модели (определения параметров выбранной модели).

Однако, как показывает опыт эксплуатации динамических объектов, в некоторых случаях снижение эффективности испытаний связано с неправильным выбором типа модели исследуемого объекта, предметной области. Все это в полной мере относится и к процессу управления АДО. Большое число контролируемых параметров, неопределенность воздействия среды и внутреннего состояния бортовой аппаратуры (БА), взаимовлияние параметров, отсутствие или невозможность учета неконтролируемых воздействий (помехи, шумы и т. д.) требуют исследования направлений совершенствования процесса структурной идентификации систем. Выходом из сложившейся ситуации является использование подходов к решению задачи идентификации, основанных на применении искусственного интеллекта [3].

Таким образом, необходимо разработать и определить структуру интеллектуальной системы, в роли которой выступает экспертная система (ЭС) поддержки и принятия решений для выбора моделей в процессе испытаний АДО. Важным элементом данной системы, в рамках создаваемого специального математического обеспечения, является модель интеллектуальной обработки диагностической информации о состоянии объекта и среды.

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ АВТОНОМНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИХ ИСПЫТАНИЯХ

Структурная идентификация подразумевает выбор типа модели системы (объекта), известного с определенной точностью в отношении его параметров, что, в свою очередь, включает в себя выбор математического инструмента к формализованному описанию АДО, которое адекватно отражает процессы в рассматриваемом объекте. В данном контексте под оператором модели понимается как структура модели, так и сама необходимая модель. Модели классифицируются по различным характеристикам, среди которых ключевыми являются такие характеристики, как сосредоточенность или распределенность параметров, линейность или нелинейность, статичность или динамичность, стационарность или нестационарность, непрерывность или дискретность, детерминированность или стохастичность (например, класс – это комбинация «линейных динамических стационарных непрерывных детерминированных систем с сосредоточенными параметрами» и т. д.).

Выбор класса модели, как правило, не соответствует решению задачи структурной идентификации АДО. Это объясняется тем, что для одного и того же класса моделей могут применяться различные операторы. Данное обстоятельство приводит к тому, что количество доступных операторов превышает количество классов моделей. Как показал анализ процессов структурной идентификации АДО различного назначения, на практике используется многоэтапная процедура, на каждом этапе которой по каждому признаку (свойству) и решается двухальтернативная задача выбора (принятия решения). Следовательно, для реализации структурной идентификации АДО разработку и использование моделей объекта можно рассматривать как проведение двух этапов (рис. 1).



Рис. 1. Схема идентификации АДО для решения задачи структурной идентификации, где ТС – техническое состояние

Первый этап – это разработка обобщенной модели, а второй – ее использование в различных вариантах (отдельных моделях) по целевому назначению (для контроля технического состояния АДО). В результате получаем множество моделей объекта под конкретную задачу.

Анализ исследований на предприятиях промышленности и в конструкторских бюро производства АДО различного назначения, а также возможности использования универсального оператора класса модели позволили сформулировать новый подход к структурной идентификации. Применительно к задаче технического диагностирования АДО, связанной с контролем ТС, необходимо использовать адекватные математические модели функционирования отдельных подсистем объекта с учетом целостности взаимодействия всех подсистем и далее решать задачу параметрической идентификации. По существу, математическая модель автономного динамического объекта будет представлять собой декомпозицию моделей отдельных подсистем данного АДО. В зависимости от условий проведения испытаний, таких как их назначение, сроки и т. д., будет выбрана и применена необходимая модель на основе классификации. Если все управляющие воздействия, предусмотренные моделью, будут успешно реализованы и параметры модели совпадут с характеристиками объекта испытаний, то будет принято решение об исправности проверяемых систем. В противном случае переопределяется модель с другим коэффициентом глубины диагностирования или возможен выбор другого типа модели для поиска причины и места неисправности.

В результате с учетом реализации обозначенной идеи возникает задача разработки интеллектуальной системы испытаний (ЭС) с реализацией функции поддержки принятия решений при структурной идентификации автономных динамических объектов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИСПЫТАНИЙ АВТОНОМНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В качестве основы интеллектуальной системы испытаний АДО в рамках решения задачи поддержки и принятия решений при структурной идентификации предлагается «симбиоз» – «экспертная система + нейронная сеть». Экспертная система определяет структуру и семантическую нагрузку системы поддержки принятия решений, а искусственные нейронные сети выступают как средство решения задачи выбора моделей.

Таким образом, в качестве ядра интеллектуальной системы испытаний АДО выступает следующая модель обработки информации при структурной идентификации:

$$\Xi = \langle M_M, G, Y_o, Y_{cp}, K, T \rangle, \quad (1)$$

- где M_M – множество математических моделей функционирования АДО (моделей процессов контроля), синтезированных в условиях наличия априорной информации;
- G – множество правил (метапроцедур, методов, алгоритмов) выбора моделей на основе функций (свойств) искусственного интеллекта, при этом $G \in F_{AI}$, где F_{AI} – функция искусственного интеллекта;
- Y_o, Y_{cp} – параметры объекта испытаний и среды;
- K – критерии проведения испытаний; параметры объекта испытаний и среды;
- T – множество моментов времени анализа и правил непрерывной работы разрабатываемой системы.

Постановку задачи синтеза интеллектуальной системы испытаний АДО можно сформулировать в следующем виде.

Дано:

- 1) априорная информация об объекте;

- 2) параметры объекта испытаний и среды;
- 3) критерии проведения испытаний.

Найти: необходимо синтезировать экспертную систему Ξ на основе разработки G , позволяющую повысить вероятность правильной классификации – P , т. е. адекватно (в реальном масштабе времени) решать задачу структурной идентификации – выбирать математическую модель M_M (модель процесса контроля ТС и функционирования АДО) на основе параметров объекта и среды – Y_o, Y_{cp} (отображение ρ), критериев проведения испытаний K и с учетом ограничений на время t и ресурсоемкость r процесса идентификации. Таким образом,

$$\left. \begin{aligned} \Xi : P(Y_o, Y_{cp}, K, G) &\rightarrow \max \\ G &\in \Xi \\ \rho : Y_o \times Y_{cp} \times T &\xrightarrow{P_{AI}} M_M \times T, \\ (t, r) &\in K, t \leq t^{TP}, r \leq r^{TP}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где ρ – отображение, которое сопоставляет входные параметры с математической моделью функционирования АДО для решения задач испытаний.

Следовательно, основным этапом разработки предлагаемой экспертной системы является определение множества правил и механизма выбора моделей на основе нейронных сетей в реальном масштабе времени. Синтез математических моделей является этапом формирования банка моделей при решении задачи параметрической идентификации бортовых систем АДО. Выбор параметров для анализа объекта испытаний и среды играет существенную роль в определении правил выбора моделей.

ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ВЫБОРА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

На сегодняшний день разработано достаточно большое количество экспертных систем. Для выбора требуемой структуры ЭС, с целью решения задачи структурной идентификации АДО, необходимо рассмотреть общую классификацию, которая представлена на рис. 2.

Экспертные системы	По решаемой задаче	Интерпретация данных
		Диагностика
		Мониторинг
	По связи с реальным временем	Оптимизация
		Прогнозирование
		Планирование
		Обучение
	По степени интеграции	Проектирование
		Статические
		Квазидинамические
		Динамические
		Автономные
		Полуавтономные
		Гибридные или интегрированные

Рис. 2. Типы экспертных систем

Ключевыми задачами, которые решают динамические экспертные системы, являются: мониторинг в режиме реального времени, обнаружение неисправностей и диагностика, оптимизация.

Анализ данной схемы показал, что среди специализированных систем, основанных на знаниях, наибольшее значение имеют экспертные системы реального времени, также известные как динамические экспертные системы, которые интегрированы в систему испытаний (гибридные).

Экспертные системы реального времени должны соответствовать определенным критериям. В частности, они обязаны обрабатывать данные, изменяющиеся во времени и поступающие из внешних источников, а также обеспечивать их анализ и, при необходимости, хранение. Такие системы должны одновременно осуществлять анализ нескольких различных асинхронных процессов, что подразумевает планирование обработки поступающих процессов в соответствии с установленными приоритетами. Кроме того, необходимо наличие механизма принятия решений в условиях ограниченных ресурсов, таких как время и память.

Внедрение данных требований предполагает обеспечение высокой производительности системы и ее способности одновременно выполнять несколько задач. Это возможно обеспечить за счет использования нейронных сетей в экспертных системах при решении задач распознавания, интерпретации состояний объектов и среды, оценки текущего состояния с целью выбора математической модели функционирования АДО. Для этого необходимо использовать априорную информацию о поведении систем и применять ее при обучении нейронных сетей.

Нетрудно сделать вывод, что одной из главных задач является задача использования экспертной системы с применением нейронных сетей в задачах распознавания и интерпретации процессов функционирования объектов по данным состояния объекта и среды с целью решения задачи структурной идентификации АДО.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

При полной наблюдаемости любой системы АДО возможно определение ее состояния на основании данных, полученных с выходных сигналов. Цель испытаний АДО при эксплуатации заключается в определении его технического состояния в результате применения различных метапроцедур G , которые выбирают последовательность моделей, соответствующих наблюдаемому текущему состоянию всей системы (АДО).

Задача, связанная с определением наблюдаемого состояния системы и отнесения его к одному из заранее заданных результатов выполнения метапроцедуры, является задачей классификации. Решение данной задачи представляет собой этап процесса структурной идентификации АДО, на котором применяются свойства искусственного интеллекта, реализованные с помощью нейронных сетей, и который заключается в поиске отображения:

$$P: \langle Y_o(t), Y_{cp}(t) \rangle \rightarrow G, \quad (3)$$

т. е. отображения параметров предметной области (объекта и среды) в текущий момент времени t в конкретные метапроцедуры G выбора моделей для решения задач испытаний АДО.

Пусть S_n – начальное состояние АДО (объекта). Задача состоит в наблюдении за объектом и, в зависимости от результатов наблюдения, переводе предметной области из состояния S_n в заданное целевое состояние S_c . Это возможно только при условии применения допустимых действий из заданного множества $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$. В связи с этим необходимо решать задачу выбора операций g_i и определения последовательности их выполнения. Схема решения в данном контексте может быть представлена в виде формулы

$$Z = \left(S(t) : S_n(t_1) \xrightarrow{G} S_n(t_2) \right)_{t \in T} \quad (4)$$

Состояние объекта $S(t)$ наблюдается в каждый момент времени $t \in T$. В случае удовлетворительного состояния объекта в каждый момент времени $t \in T$, т. е. наблюдается соответствие входного состояния экспертной системы параметрам объекта и используемой модели, принимается решение об отсутствии задачи структурной идентификации. В противном случае при возникновении аномальной ситуации в момент времени $t_1 \in T$ или при изменении критериев использования объекта решается задача

$$S_n(t_1) \xrightarrow{G} S_n(t_2). \quad (5)$$

Последовательность $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ является алгоритмом для решения задачи, выступая в роли метапроцедуры искусственного интеллекта. Следует отметить, что существуют несколько способов перевода $S_n \xrightarrow{G} S_n$. В данной ситуации можно поставить задачу по оптимизации решения. Анализ показал, что для эффективности решения задач, связанных с испытаниями в реальном времени, перевод $S_n \xrightarrow{G} S_n$ возможен исключительно благодаря использованию нейросетевых структур.

С целью решения задачи классификации при разработке ЭС необходимо определить механизмы решения задачи классификации с помощью нейронных сетей. Выходом из сложившейся ситуации являются исследование и формализация обработки информации при ассоциативных процессах мыслительной деятельности человека [4, 5].

Ассоциация представляет собой закономерную связь между отдельными событиями, фактами, предметами или явлениями, которые отражаются в сознании и фиксируются в памяти. Когда между двумя психическими явлениями C и M существует ассоциативная связь, возникновение явления C в сознании человека предопределяет появление другого явления M в его сознании (рис. 3).

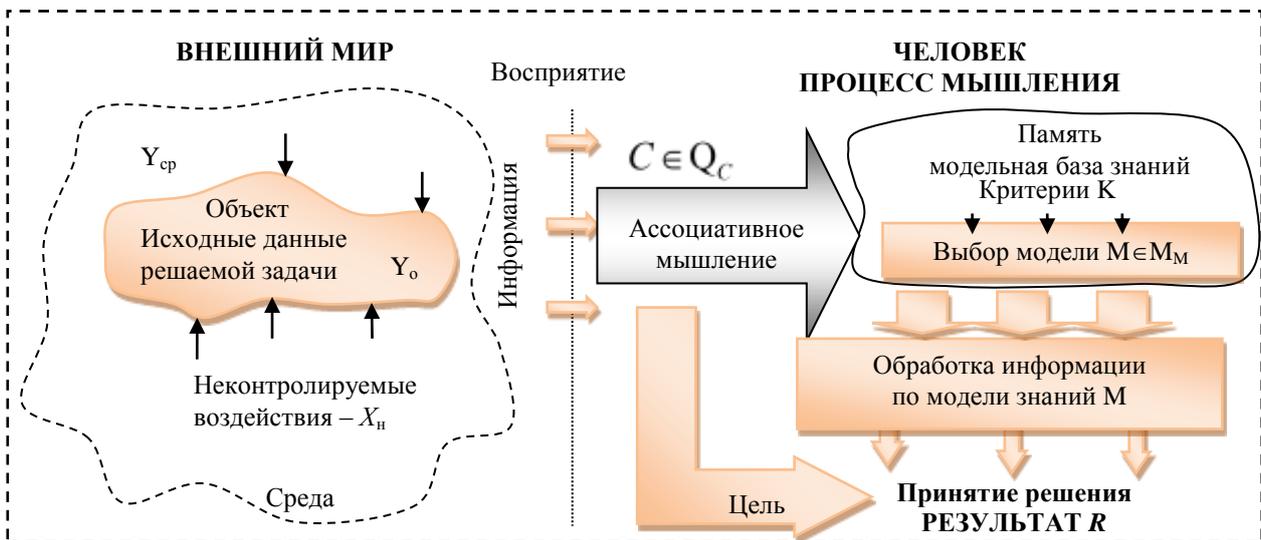


Рис. 3. Модель обработки информации человеком при решении задачи

Память человека представляет собой модельную базу знаний, сформированную на протяжении всей жизни. Качество или адекватность моделей, а следовательно, и эффективность решения задач определяются качеством обучения человека. По сути, модельная база знаний человека – это распределенная структура, которая организуется для решения любой поставленной задачи в виде модели M . Цель формируется исходя из предпосылок стремления ди-

намической нейросетевой системы к оптимизации в рамках адаптации к внешним условиям и явлению C .

Таким образом, основная задача представления искусственного интеллекта, а именно ассоциативного мышления, заключается в выделении в процессе мышления цепочки G , алгоритма классификации (рис. 4).



Рис. 4. Алгоритм решения задачи классификации

Решение задачи классификации является важным этапом в процессе корректного выбора модели поведения объекта для испытаний АДО. Оно сводится к поиску отображения:

$$\zeta : C \in Q_c \times K \in Q_K \rightarrow M \in M_M. \quad (6)$$

Основным фактором, влияющим на качество обработки информации при классификации, является результат отображения множества Q_c в множество M_M . Отображение характеризует процесс отнесения любого явления (входного состояния) $C \in Q_c$ к соответствующей этому явлению модели $M \in M_M$ при соответствующих критериях K . Данное отображение можно представить в виде схемы классификации, показанной на рис. 5.

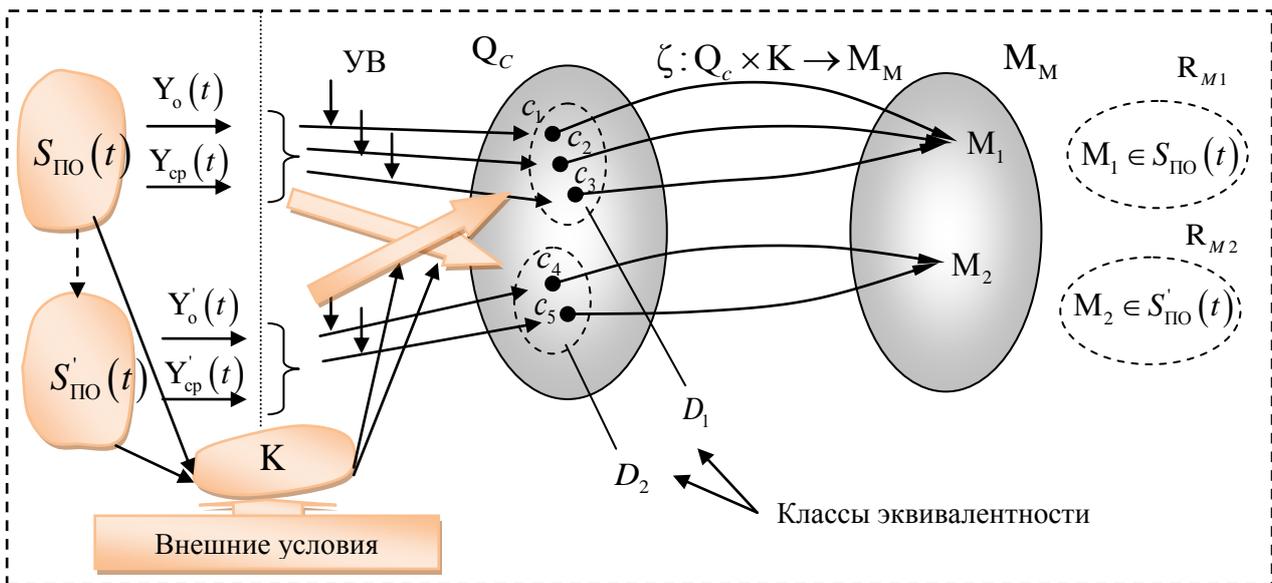


Рис. 5. Схема классификации

Указанное отображение по своему смысловому содержанию называется сюръекцией, естественным наложением, что может быть представлено следующим образом:

$$\forall M \exists C (\rho(C) = M). \quad (7)$$

Решение задачи наблюдения определяет контроль состояния объекта и среды $S_{\text{ПО}}(t)$ по выходным параметрам $Y(t)$ и $Y_{\text{ср}}(t)$. В результате воздействия неконтролируемых факторов (шумы, помехи) возможно формирование различных входных состояний $\{c_1, c_2, c_3\}$. Однако данное множество прообразов (входных состояний) $\rho(C)$ отображается в модель M_1 .

Формирование класса эквивалентности D_1 для состояния объекта будет осуществляться нейронными сетями за счет свойств обобщать. В зависимости от изменения критерия K возможен переход в класс эквивалентности D_2 , что будет классифицироваться как выбор модели M_2 (например, проведение сокращенных испытаний). Модель M_2 будет использована в объекте для решения задачи испытаний при других внешних условиях (критериях).

Таким образом, на явление C воздействует среда и внешние условия (критерии), которые определяют неоднозначность в смысле разброса его значений (входного состояния). Следовательно, входной вектор будет формировать разное входное состояние экспертной системы как для модели M_1 , так и для модели M_2 в случае существенных изменений состояния объекта и критерия. Входное состояние вместе с критериями определяет суть данных, которые, в свою очередь, определяют точку принадлежности результата соотнесения к выбираемой модели.

Данная схема является универсальной с точки зрения обработки информации в реальном масштабе времени, так как использование экспертной системы позволяет со временем прохождения сигнала по сети определять требуемую модель.

Итак, математическую модель обработки информации можно представить в виде

$$M_{AI} = \langle Y_o, Y_{\text{ср}}, Q_c, M_M, K, R_M, T, \gamma, \zeta, \mu \rangle. \quad (8)$$

- где
- Y_o – множество параметров объекта контроля (исходные данные);
 - $Y_{\text{ср}}$ – множество параметров среды (шум, помеха, дополнительные данные);
 - Q_c – множество явлений, входных состояний;
 - M_M – множество моделей (знаний);
 - K – критерии выбора модели;
 - R_M – множество результатов обработки (выбранных моделей);
 - T – множество моментов времени;
 - γ – функция входа, отображение входных параметров во входное состояние экспертной системы, $\gamma: Y_o \times Y_{\text{ср}} \times T \rightarrow Q_c \times T$;
 - ζ – функция выбора модели, $\zeta: Q_c \times K \times T \rightarrow M_M \times T$
 - μ – функция выхода экспертной системы, $\mu: M_M \times T \rightarrow R_M$.

Кроме того, $Y_o \times Y_{\text{ср}}$ – это входной образ системы (предметной области).

Процесс получения результата можно определить следующей связью отображений по реализации метапроцедур G :

$$G: \gamma \rightarrow \zeta \rightarrow \mu. \quad (9)$$

Не углубляясь в методы задания множества M_M , напомним, что каждой модели объекта соответствует конкретное подмножество его текущих входных состояний, объединенных общими свойствами. Это означает, что для таких состояний может быть принято одно и то

же решение. Легко заметить, что отдельные состояния, составляющие данное подмножество, должны находиться в отношении эквивалентности. Бинарное отношение, которое определяет это соответствие, называется отношением эквивалентности

$$Q_C = (Y_o \times Y_{cp}) \times (Y_o \times Y_{cp}), \quad (10)$$

которое обладает следующими свойствами:

– рефлексивностью

$$\forall (Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle} \in Y, \left((Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle}, (Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle} \right) \in Q_C;$$

– симметричностью

$$\left((Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 1}, (Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 2} \right) \in Q_C \Rightarrow \left((Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 2}, (Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 1} \right) \in Q_C;$$

– транзитивностью

$$\begin{aligned} & \left((Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 1}, (Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 2} \in Q_C \right) \wedge \left((Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 2}, (Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 3} \in Q_C \right) \\ & \Rightarrow \left((Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 1}, (Y_o, Y_{cp})_{\langle l \rangle 3} \in Q_C \right). \end{aligned}$$

Отношение эквивалентности формирует разбиение множества Y ($Y_o, Y_{cp} \in Y$) и всех состояний объекта и среды на непересекающиеся классы, что позволяет осуществить факторизацию данного множества. Обозначим полученное фактор-множество как Y/Q_C . В соответствии с этим обозначением, операцию факторизации можно представить в виде отображения

$$\lambda: Y \rightarrow Y/Q_C, \quad (11)$$

которое в своем значении является наложением (сюръекцией). В рамках рассматриваемой задачи целесообразно установить взаимно однозначное соответствие между множеством моделей M_M и фактор-множеством Y/Q_C , т. е. чтобы отображение

$$\nu: M_M \rightarrow Y/Q_C \quad (12)$$

было взаимно однозначным (биекцией). Это достигается тогда (согласно теореме о гомоморфизме), когда выполняется условие

$$\zeta \nu = \lambda, \quad (13)$$

а это, в свою очередь, возможно, если отображение (11) – естественное, а отображение (6) – наложение.

Данная формулировка задачи является конструктивной, поскольку она позволяет разбить множество состояний объекта и среды, входных состояний экспертной системы, которое, в общем случае, может быть бесконечным, на конечное и, как правило, небольшое количество классов, каждый из которых соответствует конкретной модели. Это упрощает процесс структурной идентификации, делая его доступным для объектов любой сложности и возможным для решения на основе экспериментальных данных, полученных в реальных условиях.

Таким образом, задача классификации заключается в разделении множества Y на подмножество непересекающихся классов и в установлении принадлежности каждого наблюдаемого состояния объекта и среды к определенной модели. Множество M_M можно рассматривать как модель фактор-множества Y/Q_C . Важными вопросами в данной задаче являются форма представления этой модели, а также принципы и методы разделения множества состояний на классы $Y(Q_C)$. Все это направлено на создание модели объекта, которая будет учитывать реальные условия его функционирования и соответствующие требования (критерии).

Другим ключевым аспектом задачи классификации является непосредственная реализация отображений $Y \xrightarrow{\gamma} Q_C$ и $Q_C \xrightarrow{\zeta} M_M$, т. е. принятие решения о принадлежности входного

состояния объекта к одной из моделей. Это решение может быть основано на оценке степени совпадения признаков Y наблюдаемого состояния с заранее заданными значениями, т. е. с признаками модели. В этом контексте возникают вопросы: какие признаки следует использовать, сколько из них необходимо учитывать в каждом конкретном случае и в каком порядке проверять их совпадение? Ответы на эти вопросы связаны с разработкой модели процесса классификации и с созданием на ее основе соответствующих процедур и алгоритмов.

Третий и завершающий этап определения модели объекта заключается в реализации отображения

$$\mu: M_M \times T \rightarrow R_M, \quad (14)$$

которое формально связывает определенный вид состояния объекта с конкретным решением о его истинной модели, с учетом вероятностных характеристик, возможных ошибок классификации (в частности, ошибок первого и второго рода), погрешности измерений и помехи.

В совокупности все указанные этапы могут быть представлены следующей обобщенной диаграммой, полученной в результате объединения отображений (11), (12), (14):

$$\begin{array}{ccccccc} Y_o \times Y_{cp} \times T & \xrightarrow{\gamma} & Q_C \times K \times T & \xrightarrow{\zeta} & M_M \times T & \xrightarrow{\mu} & R_M \\ & \searrow \lambda & & \swarrow \nu & & & \\ & & Y/Q_C & & & & \end{array} \quad (15)$$

Реализация процесса классификации, согласно приведенной диаграмме, включает два основных этапа. На первом этапе проводится значительное количество экспериментов, связанных с имитацией различных состояний системы, включая нежелательные, как в лабораторных, так и в натуральных условиях. В рамках этих экспериментов также осуществляется наблюдение за действующим объектом. В этот момент формируется входное состояние ЭС, основанное на наблюдении входного образа объекта и среды в момент времени T , по соответствующим параметрам Y_o , Y_{cp} . При каждом воспроизведении очередного состояния объекта последовательно осуществляется отображение γ . Данный этап является достаточно простым и связан с решением задачи наблюдения. Результатом его выполнения становится определение множества Q_C . Задача наблюдения в прямой постановке состоит в выявлении оптимального в некотором смысле преобразования F по входным параметрам Y_o , Y_{cp} во входное состояние Q_C .

При каждом воспроизведении нового состояния объекта и среды последовательно реализуются отображения γ , ζ и λ . Данный процесс является достаточно трудоемким и требует значительных временных и материальных затрат. Результатом выполнения этого этапа является определение фактор-множества входных состояний Y/Q_C экспертной системы и соответствующего множества моделей M_M , которые находятся с ним во взаимно однозначном соответствии. Условно этот этап можно назвать этапом построения модели классификации, в которую включается найденное множество M_M в качестве одного из ключевых элементов.

Второй этап структурной идентификации, согласно диаграмме (15), состоит в определении реальной модели решения задачи по результатам наблюдения. Этот процесс включает последовательное выполнение отображений γ , ζ и μ . Поскольку на данном этапе производится классификация одной входящей реализации наблюдаемого состояния, затраты времени на его выполнение становятся незначительными. Рассматриваемый этап можно охарактеризовать как этап непосредственной ассоциативной классификации.

Таким образом, можно сформулировать основные задачи по разработке экспертной системы, а именно: разработка структурной схемы экспертной системы; выбор параметров контроля и среды для осуществления структурной идентификации; анализ классификаторов

и методов классификации по отношению к требованиям обработки информации при испытаниях АДО; выбор и обоснование оптимальной структуры нейронной сети; описание работы нейросетевого классификатора по реализации отображения ζ при входном состоянии и заданных критериев; описание общей структурно-диагностической модели с учетом функционирования экспертной системы; разработка методики и оценивание достоверности структурной идентификации АДО на основе использования динамической ЭС.

СТРУКТУРА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С УЧЕТОМ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Требования к экспертной системе реального времени подразумевают, что система должна быть легко адаптируемой к изменениям внешней среды. Для достижения этой цели необходимо, чтобы в ее структуре присутствовали взаимосвязанные уровни. С этой целью в ее составе необходимо наличие следующих соподчиненных уровней: обучения нейронных сетей; самоорганизации (перестройки); прогнозирования событий (ситуаций); работы с базами событий, базами данных и знаний; формирования решений; планирования операций по реализации принятых решений; адаптации.

Первые пять из перечисленных уровней составляют стратегический компонент экспертной системы, в то время как остальные обеспечивают ее тактические функции. Структурная схема ЭС с учетом выражения (8) представлена на рис. 6.

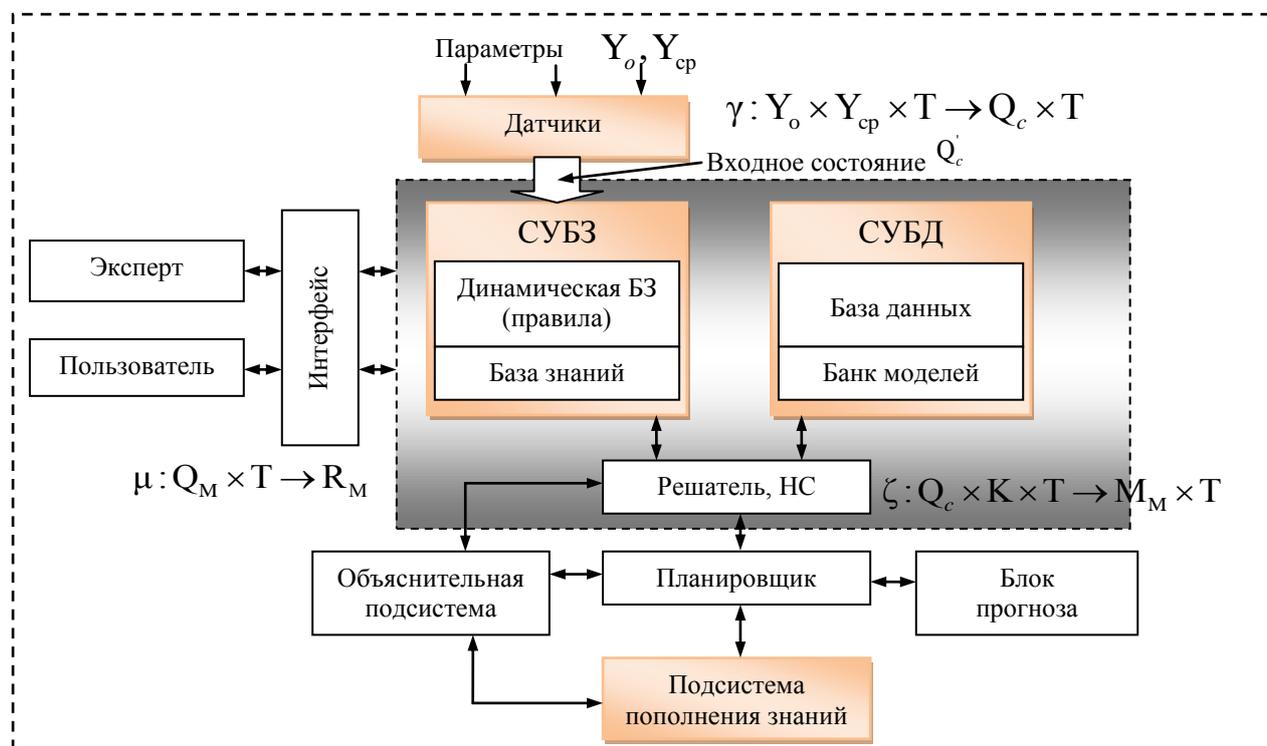


Рис. 6. Динамическая экспертная система, где СУБЗ – система управления базой знаний; БЗ – база знаний; СУБД – система управления базой данных; НС – нейронная сеть

При помощи датчиков осуществляется получение параметров объекта и среды. Здесь реализуется формирование входного состояния при помощи отображения γ . Полученный результат является исходными данными для принятия решения по выбору модели, и затем

осуществляется передача их значений в решатель. В системе управления базой знаний со- держится база знаний. База знаний экспертной системы хранит декларативные и процедур- ные знания. К процедурным относятся базы концептуальных знаний: понятия в виде формул, зависимости, таблицы, процедуры и т. д. К декларативным относятся базы экспертных зна- ний, носящие описательный (качественный) характер. При этом они тесно взаимодействуют между собой, постоянно осуществляя проверку на непротиворечивость (избыточность) зна- ний. В системе управления базами данных осуществляется хранение и реализуются операции выбора моделей в зависимости от значений параметров входного вектора, т. е. полученного состояния объекта и среды.

Решатель является универсальным вычислителем реализации метапроцедуры G , в нем ре- ализуется отображение полученного по параметрам состояния одной из моделей – ζ . Вместе с тем в решателе, кроме реализации основной функции принятия решений по сформирован- ному входному состоянию объекта и среды, реализуется еще и функция пополнения знаний при взаимодействии с планировщиком (взаимодействует с объяснительной системой, блоком прогноза и подсистемой пополнения знаний).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве основного показателя оценивания эффективности функционирования эксперт- ной системы поддержки принятия решений при структурной идентификации с реализацией модели процесса интеллектуальной обработки диагностической информации выберем оцен- ку вероятности безотказной работы экспертной системы при решении задачи классификации

$$\hat{p} = 1 - \frac{m}{N}, \quad (16)$$

где m – количество неправильных исходов классификации;

N – общее число выбора моделей в зависимости от параметров объекта и среды.

Результаты проведенных исследований в виде показателей, рассчитанных экспертной си- стемой с нейронной сетью и специалистом предметной области, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Показатель	Интеллектуальная система	
	Экспертная система с нейронной сетью	Специалист
Общее число обучающих векторов	1024	-
Продолжительность обучения, с	20	-
Число моделей	5	5
Количество изменений входного вектора N	15	15
Количество неправильного определения изменений и типа модели m	1	2
Искомая оценка	0,93	0,87
Продолжительность принятия решений, с	0,6	1200

Таким образом, разработанная экспертная система с созданной моделью процесса интел- лектуальной обработки диагностической информации при структурной идентификации ав- тономных динамических объектов характеризуется лучшими значениями точечной оценки

вероятности безотказной работы экспертной системы при решении задачи классификации в ходе проведенного эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема структурной идентификации для АДО является актуальной в современных условиях и требует новых подходов к ее решению. Одним из направлений повышения эффективности построения математической модели является использование нейронных сетей для решения задачи классификации в динамических экспертных системах. Дальнейшее развитие указанного направления возможно за счет разработки подходов к структурной идентификации АДО при возникновении неисправностей.

Список используемых источников

1. *Дмитриев А. К., Юсупов Р. М.* Идентификация и техническая диагностика. – МО СССР, 1987. – 521 с.
2. *Лоскутов А. И., Ряхова Е. А., Горбулин В. И.* Концептуальная модель технического диагностирования бортовой аппаратуры автономных космических аппаратов на основе оптимальной реконфигурации в условиях априорной неопределенности появления неисправностей // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2020. – № 3. – С. 43–55.
3. *Ручкин В. Н., Фулин В. А.* Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы. – СПб. : БХВ-Петербург, 2009. – 240 с.
4. *Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю.* Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М. : Физматлит, 2001. – 224 с.
5. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М. : Наука, 2006. – 410 с.

Н. В. Груздев¹,

кандидат военных наук, доцент;

А. А. Исупов¹;

С. С. Степанов²;

И. В. Шакмаев²

¹ВКА имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург.

²1 ГИК МО РФ, г. Мирный Архангельской обл.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ ВЫВЕДЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОКОВОГО МАНЕВРА

Представлена методика, позволяющая оценить энергетические возможности ракеты космического назначения при выполнении бокового маневра на активном участке траектории полета. Предлагаемая методика позволяет рассчитать массу компонентов ракетного топлива (КРТ), требуемых для выполнения бокового маневра и максимальную массу полезной нагрузки (ПН), выводимой на орбиту с требуемым наклоном.

Ключевые слова: ракета космического назначения, активный участок траектории полета, боковой маневр, полезная нагрузка.

ВВЕДЕНИЕ

На этапе проектирования новых ракетно-космических комплексов рассматривается вопрос о необходимости открытия новых трасс запуска и, соответственно, об отчуждении новых районов падения (РП) отделяемых частей (ОЧ) ракет космического назначения (РКН), что приведет к большим экономическим затратам [1]. При этом должны быть реализованы мероприятия по организации безопасности населения, оперативному поиску и утилизации ОЧ РКН. В настоящее время актуальным становится вопрос минимизации размеров отчуждаемых территорий в связи с активизацией хозяйственной деятельности [1, 2]. Одним из вариантов использования существующих трасс запуска без отчуждения новых районов падения отделяемых частей является изменение наклона плоскости орбиты полезной нагрузки (ПН) в процессе выведения.

На данный момент применяются несколько способов изменения наклона плоскости орбиты ПН [3, 4]. На активном участке траектории система управления (СУ) ракеты-носителя (РН) используют разворот по углу рыскания (боковой маневр). Так, например, ракета-носитель «Союз 2.1б» [5] при выведении головного блока (ГБ) в составе разгонного блока (РБ) «Фрегат» и космический аппарат (КА) «Глонасс-К» изменяют на участке полета третьей ступени наклон орбиты на 2° за счет бокового маневра. Изменение наклона плоскости орбиты на активном участке траектории фактически достигается изменением вектора скорости РН. На орбитальном участке полета изменение наклона плоскости орбиты осуществляется с помощью РБ, как и при выведении КА «Глонасс-К2». Запасов КРТ РБ существенно меньше, чем в блоках РН, и в большинстве случаев они распределяются на увеличение высот апогея и перигея в пределах начальной плоскости орбиты.

Вместе с тем некоторые из КА, управляемые КРТ, имеют возможность маневрирования или совершения межорбитального перелета, но при этом затраты на изменение наклона плоскости орбиты существенно сократят срок активного существования КА вследствие сравнительно малых объемов топливных баков, а также необходимости ориентации в пространстве и коррекции орбиты [6].

В статье рассматривается боковой маневр на активном участке полета ракеты космического назначения (РКН), который универсален как для прямого, так и для непрямого выведения полезной нагрузки (ПН). Под прямым выводением ПН понимается выведение ПН на заданную орбиту без применения разгонного блока. В случае непрямого выведения ПН в составе РКН применяется разгонный блок. Целью исследования является определение энергетических возможностей ракет-носителей, которые выводят ПН по базовым трассам, и целесообразности применения РН для выведения ПН на заданные новые орбиты с помощью бокового маневра последней ступени без открытия новых трасс запуска.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется определить энергетические возможности ракеты-носителя при изменении параметров орбиты выведения полезной нагрузки с использованием бокового маневра. Расчет осуществляется на основе опытно-теоретических оценок масс компонентов ракетного топлива (КРТ) Δm_{ψ} , требуемых для выполнения бокового маневра, и максимальной массы полезной нагрузки m_k , выводимой на орбиту с требуемым наклоном.

Исходными данными для определения энергетических возможностей ракеты-носителя при выполнении бокового маневра являются значения максимальных масс ПН, выводимых на круговые орбиты с высотой 200 км на базовых наклонах.

ДОПУЩЕНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Для расчетов используются сферическая модель Земли радиусом $R = 6371,11$ км и ускорение свободного падения $g = 9,80665$ м/с². Не учитываются особенности траектории полета РН с цифровой системой управления (СУ), реализующей терминальное наведение с учетом информации о запасах КРТ. Траектория полета РН включает участок наведения для полного расходования рабочих запасов КРТ [5, 7]. Расчеты проводятся без учета воздействий возмущающих факторов на полет РН.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ БОКОВОГО МАНЕВРА

При пуске с космодрома Плесецк максимальная масса ПН, выводимой РН типа «Союз-2», соответствует наклону $62,8^\circ$. Приведем максимальные массы ПН, выводимой РН семейства «Союз-2» на круговые орбиты высотой 200 км:

РН «Союз 2.1а» – 6870 кг;

РН «Союз 2.1б» – 7890 кг;

РН «Союз 2.1в» – 3030 кг.

Определение энергетических возможностей ракеты-носителя при выполнении бокового маневра по разработанной методике проводится в пять этапов.

Этап 1. На данном этапе осуществляется расчет массы ПН, выводимой на круговую орбиту высотой 200 км. Базовые наклоны орбит выведения ПН с космодрома Плесецк представлены на рис. 1.

Для запуска с космодрома Плесецк минимальное базовое наклонение орбиты выведения составляет $62,8^\circ$ (азимут пуска $A \approx 90^\circ$). В качестве ограничения для расчетов с западной стороны была выбрана трасса запуска с азимутом пуска $A = 270^\circ$ и наклоном $117,2^\circ$.

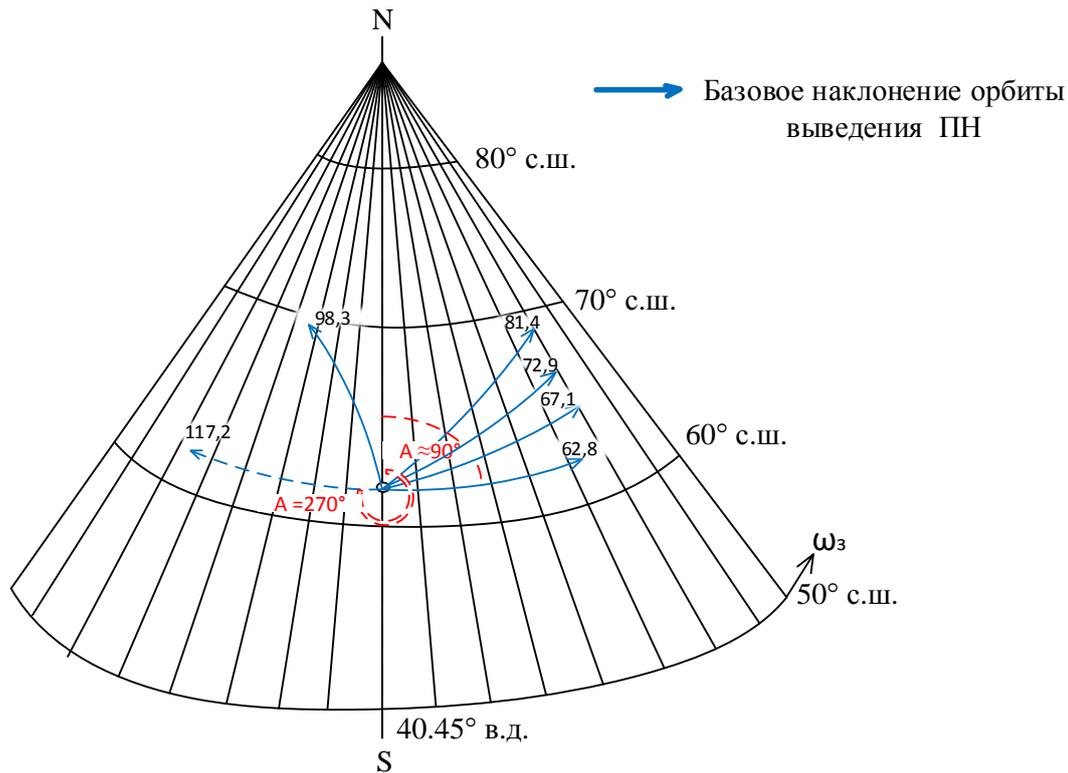


Рис 1. Базовые наклонения орбиты выведения полезной нагрузки для космодрома Плесецк

На основе исходных данных о максимальных массах ПН, выводимых на круговые орбиты с высотой 200 км на базовых наклонениях, рассчитываются частные производные масс ПН по азимуту пуска:

$$\Delta m_{m-n} = k(\sin(A_m) - \sin(A_n)), \quad (1)$$

где Δm_{m-n} – разница максимальных масс ПН, выводимых по трассам с азимутами пуска m и n , кг;

A_m, A_n – азимуты пуска m и n , рад;

k – массовый коэффициент.

С учетом исходных данных об энергетических возможностях РН определяется зависимость максимальной массы выводимой ПН от наклонения орбиты:

$$m_b = k_1 + k_2 \sin \left[\arcsin \left(\frac{\cos(i)}{\cos(B)} \right) \right], \quad (2)$$

где m_b – базовая масса ПН, выводимого на замкнутую круговую орбиту (высота 200 км), кг;

i – наклонение плоскости орбиты, рад;

B – широта точки старта, рад;

k_1 – коэффициент, характеризующий массу ПН, выводимой на орбиту по трассе с азимутом пуска $A = 0^\circ$;

k_2 – коэффициент, характеризующий изменение массы ПН.

Этап 2. На данном этапе проводится расчет масс ПН, выводимых на орбиты с различными параметрами. В качестве исходных параметров для решения задачи расчета масс ПН добавлены высоты апогея и перигея орбиты выведения ПН. Энергетические возможности РН по выведению ПН на орбиты с параметрами, отличающимися от параметров базовой орбиты, определяются массой дополнительно израсходованных или сэкономленных КРТ. Данная

масса зависит от разницы набираемой характеристической скорости при выведении на орбиту, отличающуюся от базовой:

$$\Delta m_{\text{H}} = \left(1 - e^{-\frac{\Delta V_{\text{H}}}{I_{\text{уд}} g}} \right) m_{\text{III}}, \quad (3)$$

где Δm_{H} – эквивалент изменения массы ПН за счет разницы орбиты с заданными параметрами и круговой орбиты с высотой 200 км, кг;

ΔV_{H} – эквивалентное изменение скорости (набор или недобор скорости ПН при выведении на орбиту, отличающуюся от круговой орбиты с высотой 200 км), м/с;

$I_{\text{уд}}$ – удельный импульс маршевой двигательной установки последней ступени в пустоте, кгс·с/кг;

m_{III} – масса в конце работы последней ступени, кг.

Масса КРТ, дополнительно затраченная на выполнение бокового маневра на участке полета последней ступени РН, эквивалентна изменению массы ПН.

Масса ПН, выводимой на орбиту с заданными параметрами, рассчитывается по формуле

$$m_{\text{H}} = m_{\text{б}} + \Delta m_{\text{H}} \quad (4)$$

Очевидно, что за счет меньшей высоты перигея орбиты при выведении ПН экономится некоторая часть КРТ и, наоборот, дополнительно расходуется в случае выведения ПН на орбиту с большими высотами апогея и перигея.

Этап 3. На данном этапе проводится расчет зависимости величины бокового маневра от наклона плоскости орбиты:

$$\Delta A = \int_{i_{\text{б}}}^{i_{\text{тр}}} (a_1 i^2 + a_2 i + a_3) di, \quad (5)$$

где ΔA – требуемое изменение азимута вектора скорости РН для изменения наклона плоскости орбиты;

$i_{\text{б}}$ – базовое наклонение плоскости орбиты;

$i_{\text{тр}}$ – требуемое наклонение плоскости орбиты.

С увеличением широты подспутниковой точки начала выполнения маневра увеличивается коэффициент сближения меридианов, определяемый с использованием выражения вида

$$k_{\text{сбл.м.}} = \frac{1}{\cos(\varphi)} \quad (6)$$

где φ – широта подспутниковой точки, рад.

Этап 4. На данном этапе проводится расчет масс КРТ, требуемых для выполнения бокового маневра. Масса КРТ, затрачиваемая на боковой маневр, вычисляется по формуле

$$\Delta m_{\psi} = \left(1 - e^{-\frac{\Delta V_{\psi}}{I_{\text{уд}} g}} \right) m_{\text{III}} \quad (7)$$

где Δm_{ψ} – масса КРТ, затрачиваемая на боковой маневр, кг;

ΔV_{ψ} – величина импульса для изменения вектора скорости РН, кг.

Этап 5. На данном этапе проводится расчет максимальной массы ПН, выводимой на орбиту с требуемым наклонением. В ходе расчета масс ПН, выводимых на орбиты с различными параметрами, необходимо дополнительно рассмотреть способ сброса головного обтекателя (ГО) по временной уставке. Это обусловлено тактико-техническими характеристиками ПН и необходимостью попадания створок обтекателя в заданные РП. Например, в случае необходимости дополнительной защиты КА от аэродинамического нагрева в плотных слоях атмосферы применяется поздний сброс ГО. Изменение массы ПН за счет сброса ГО по временной уставке рассчитывается по формуле

$$\Delta m_{\text{ПН}} = \dot{m} \left(\frac{da \Delta t_{\text{сго}}}{a_{\text{ср}}} + \frac{da \Delta t_{\text{сго}}}{a_{\text{гк}}} \right), \quad (8)$$

- где \dot{m} – массовый расход КРТ при работе двигательной установки второй ступени, кг/с;
 da – приращение ускорения за счет сброса ГО, м/с²;
 $\Delta t_{\text{сго}}$ – временная уставка сброса ГО, с;
 $a_{\text{ср}}$ – среднее ускорение РН на участке упреждающего сброса ГО, м/с²;
 $a_{\text{гк}}$ – ускорение движения РН в окрестности момента выключения двигательной установки второй ступени, м/с².

АПРОБАЦИЯ

В качестве прототипа в расчетах используются характеристики РН семейства «Союз-2», оснащенной жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) на компонентах топлива жидкий кислород и керосин.

Расчет базовых масс ПН, выводимых на круговую орбиту с высотой 200 км. По формуле (2), учитывая коэффициенты k_1 и k_2 , проведем расчет влияния угловой скорости вращения Земли на массу выводимой ПН.

Для РН семейства «Союз-2»:

$k_1 = 6126$, $k_2 = 744$ для РН «Союз 2.1а»;

$k_1 = 7202$, $k_2 = 688$ для РН «Союз 2.1б»;

$k_1 = 2450$, $k_2 = 580$ для РН «Союз 2.1в».

Зависимость массы ПН, выводимой на круговую орбиту с высотой 200 км, от наклона орбиты выведения для РН семейства «Союз-2» представлена на рис. 2.

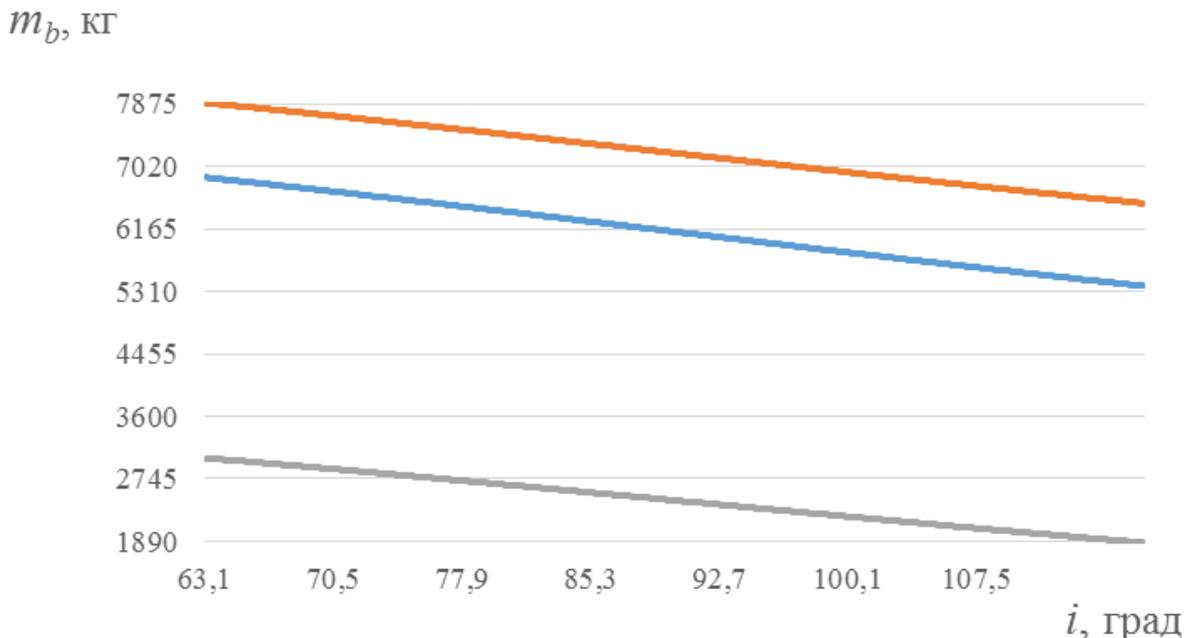


Рис. 2. Зависимость базовой массы полезной нагрузки, выводимой на круговую орбиту с высотой 200 км, от наклона орбиты выведения

По мере изменения наклона плоскости орбиты в сторону 90°, масса выводимого ГБ уменьшается ввиду влияния угловой скорости вращения Земли. Например, при пусках РН

с космодрома Плесецк на минимально возможное базовое наклонение $62,8^\circ$, представляется возможным выведение ПН максимальной массы, так как в данном случае азимут пуска будет приблизительно равен 90° и направление движения совпадет с направлением вращения Земли. При выведении ПН на обратные орбиты направление вращения Земли будет препятствовать выведению ПН, снижая энергетические возможности РН.

Определение зависимости величины бокового маневра от наклонения плоскости орбиты. При всем диапазоне возможных наклонений, для пусков РН семейства «Союз-2» с космодрома Плесецк выделено пять базовых трасс. Используя выражение (5), строится аппроксимирующая кривая второго порядка (рис. 3). Коэффициенты полинома (5) имеют значения:

$$a_1 = 0,0071919; a_2 = -1,29148; a_3 = 60,16482.$$

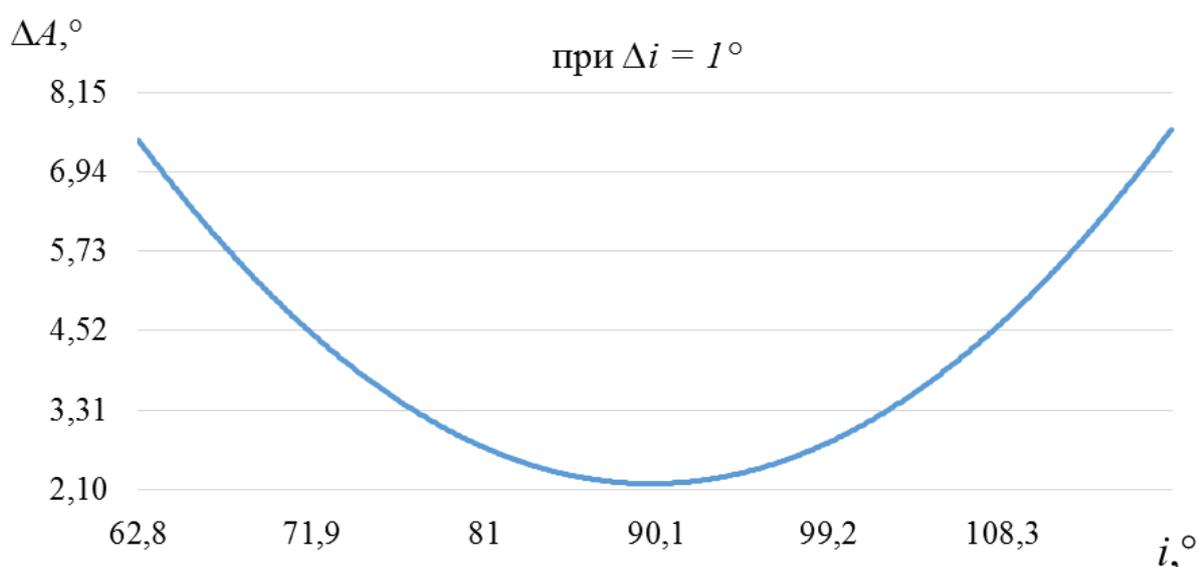


Рис. 3. Зависимость величины требуемого бокового маневра от наклонения плоскости орбиты

Для изменения наклонения плоскости орбиты выводимой ПН с помощью бокового маневра при пуске РН с азимутом 90° потребуется больший разворот по углу рыскания РН, чем в случае движения в сторону полюса, где расстояние между меридианами минимально. Например, при запуске ПН на солнечно-синхронную орбиту для изменения наклонения плоскости орбиты на 1° потребуется разворот РН по углу рыскания на $2,5^\circ$, а при выведении на орбиты с наклонением $62,8^\circ$ требуемое значение угла по рысканию составит $7,4^\circ$.

Таким образом, при выведении ПН на приполярные орбиты требуется маневр по меньшему углу рыскания для изменения наклонения плоскости орбиты выводимой ПН.

В качестве примера изменения плоскости орбиты ПН на участке выведения за счет бокового маневра рассматривается боковой маневр третьей ступени РН «Союз 2.1б» при выведении КА «Глонасс-К». Изменение наклонения плоскости орбиты на активном участке траектории на 2° фактически достигается изменением вектора скорости РН.

На орбитальном участке полета изменение наклонения плоскости орбиты осуществляется с помощью РБ, как при выведении КА «Глонасс-К2» (рис. 4).

Расчет масс КРТ, требуемых для выполнения бокового маневра.

Масса КРТ, затрачиваемая на боковой маневр, вычисляется по формуле (7). В качестве примера рассчитана масса КРТ для РН «Союз 2.1б». Искомая масса КРТ находится в экспоненциальной зависимости от импульса скорости, за счет которого выполняется маневр (рис. 5).

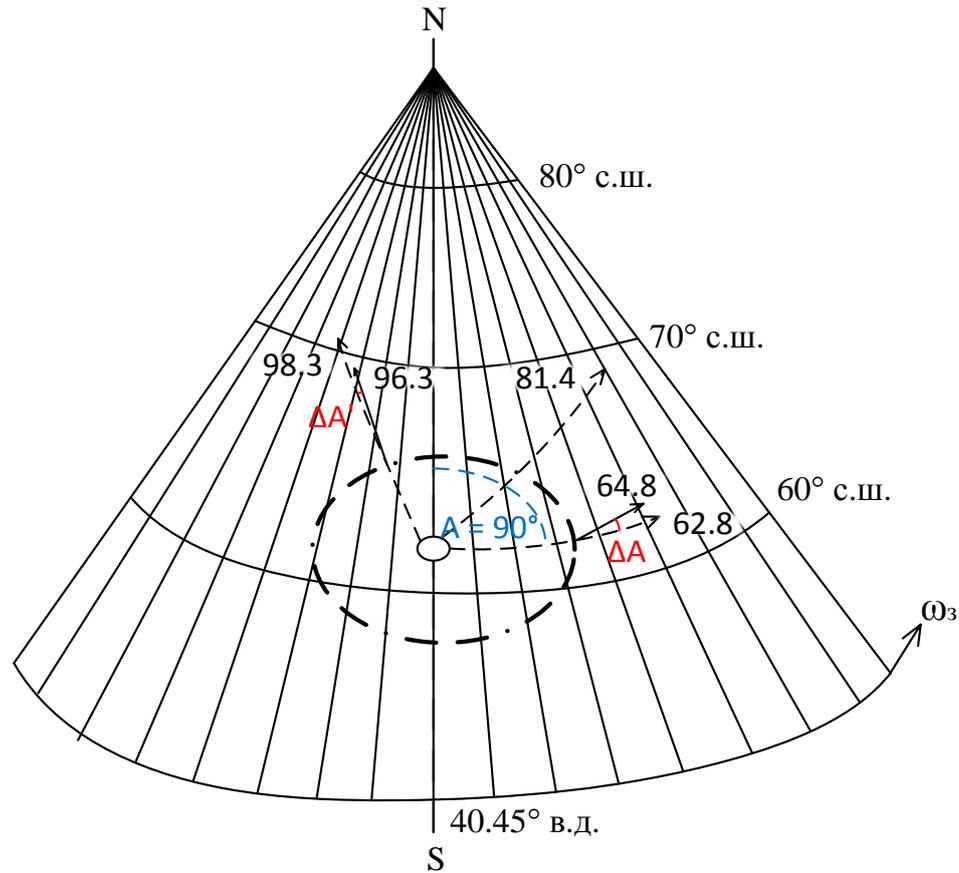


Рис. 4. Наклонения орбиты выведения полезной нагрузки по базовым трассам с использованием бокового маневра

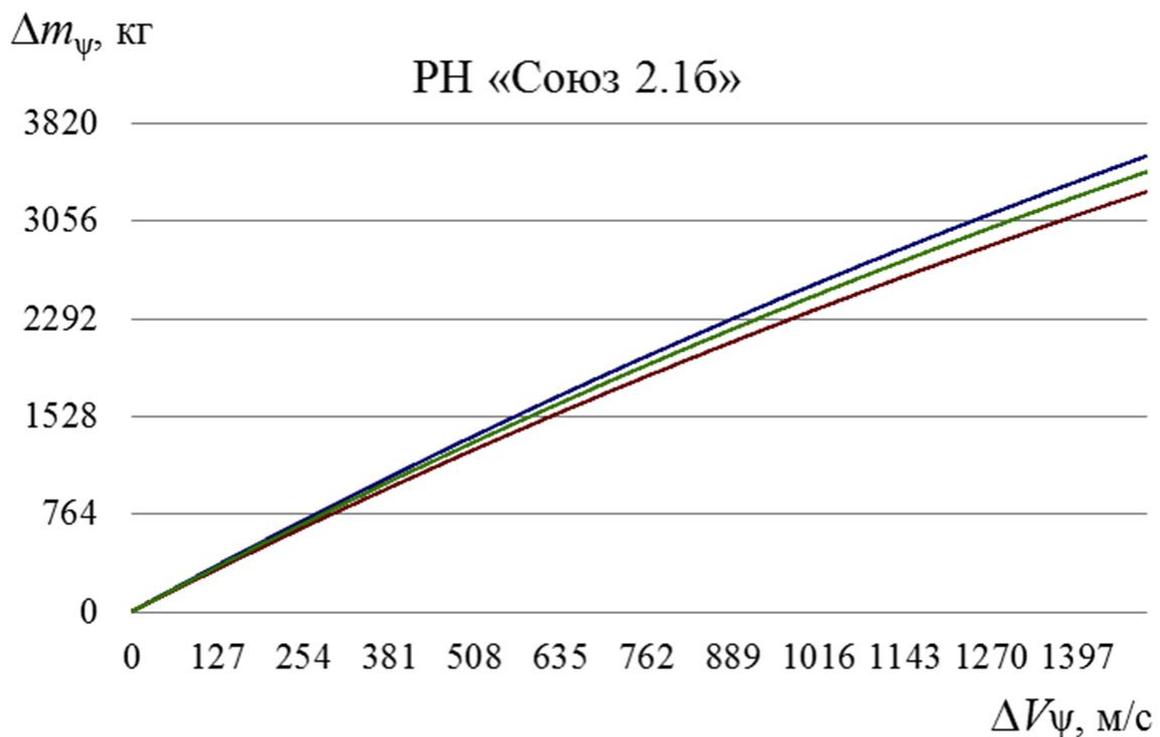


Рис. 5. Зависимость массы КРТ, требуемой для выполнения бокового маневра, от величины импульса скорости

Для расчета массы ПН используем формулу (8), а также учитываем изменение массы ПН за счет сброса ГО по временной уставке.

Сброс ГО массой 1500 кг позволяет увеличить или уменьшить массу ПН для РН семейства «Союз-2» на величины, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Производные массы ПН по времени сброса ГО

РН	«Союз 2.1а»	«Союз 2.1б»	«Союз 2.1в»
$\frac{dm_{\text{ПН}}}{dt_{\text{сго}}}$, кг/с	3,2	3,4	7,6

Например, для РН «Союз 2.1в» сброс створок ГО осуществляется на участке полета последней (второй) ступени, поэтому каждый сэкономленный килограмм КРТ приводит к увеличению массы ПН на эту же величину. Таким образом, ранний сброс ГО позволяет увеличить массу выводимой ПН.

Для расчета максимальной массы ПН, которую способна вывести РН на орбиту с заданным наклоном, воспользуемся формулой (9).

На рис. 6 представлены опытные высоты полета РН «Союз-2.1а» с различными ПН.

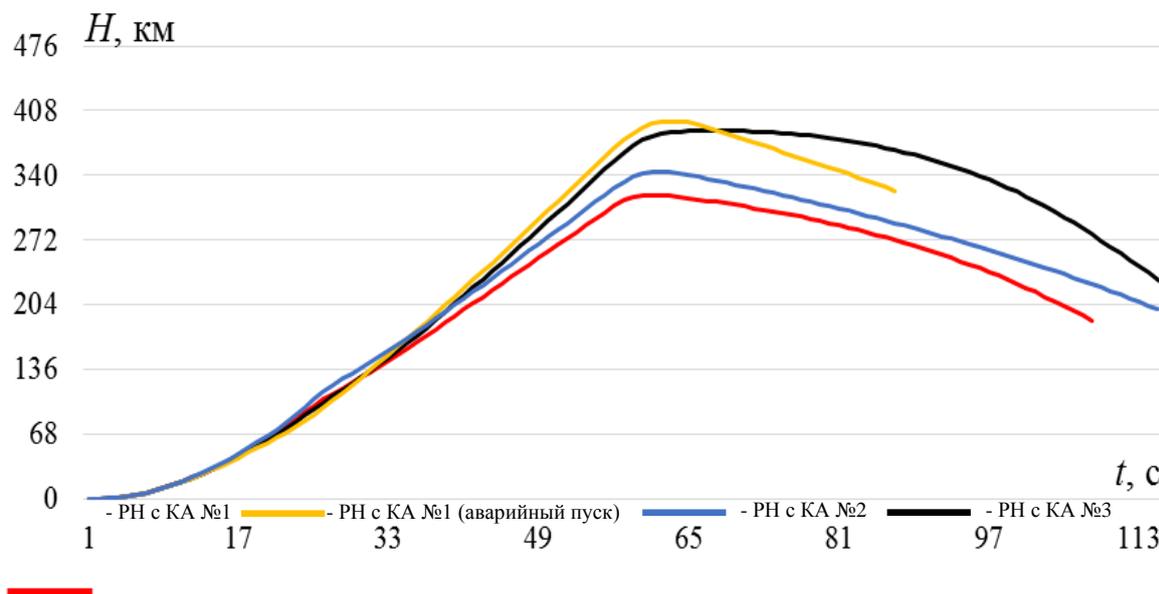


Рис. 6. Изменение высоты полета РН от момента «контакт подъема» до момента отделения полезной нагрузки

Участок работы последней ступени РН с КА № 1 (рис. 6) находится на более низкой высоте, чем остальные РН, так как полет РН на указанном участке происходит по расчетной траектории. Кроме того, данная РН не совершает бокового маневра для изменения наклона плоскости орбиты. Остальные РН на участке работы последней ступени увеличивали угол наклона вектора скорости к местному горизонту для израсходования рабочих остатков КРТ перед отделением ПН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования получены зависимости энергетических возможностей РН по изменению параметров орбиты выведения ПН с использованием бокового маневра. Дополнительно рассмотрено влияние временной уставки выдачи команды сброса ГО на массу ПН.

Таким образом, за счет снижения максимальной массы ПН представляется возможным использование базовых трасс для выведения на заданные орбиты с новыми наклонениями. Несмотря на меньшую величину требуемого бокового маневра на приполярных орбитах для одинакового изменения наклонения, наиболее доступным является маневр, проводимый на меньших наклонениях. За счет влияния угловой скорости вращения Земли на наклонении $62,8^\circ$, представляется возможным вывести ПН максимальной массы. При выборе базовой трассы для выведения ПН на прямую орбиту с новым наклонением следует отдать предпочтение той трассе, величина азимута пуска которой больше. На участках работы первой и второй ступеней РН «Союз-2» расходуется КРТ на преодоление плотных слоев атмосферы. Кроме того, на этих участках траектории полета РН осуществляет движение строго по базовым трассам из-за ограничений, обусловленных необходимостью попадания ОЧ РН в заданные РП [2]. Поэтому наиболее рациональным вариантом предполагается использование бокового маневра на участке работы третьей ступени. Подводя итог, следует отметить, что использование существующих трасс запуска с последующим изменением наклонения плоскости орбиты выведения позволяет избежать затрат на отчуждение новых районов падения отделяемых частей РКН.

Список используемых источников

1. Проблемные вопросы использования трасс запусков космических аппаратов и районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения : моногр. / В. В. Авдошкин [и др.]; под ред. А. С. Фадеева, Н. Ф. Аверкиева. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. – 372 с.
2. Кротова Л. В., Груздев Н. В., Исупов А. А. Методический подход к повышению точности прогнозирования точек падения отделяющихся частей ракет космического назначения // Информация и Космос. – 2022. – № 2. – С. 207–213.
3. Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А., Салов В. В. Баллистика ракет космического назначения. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2020. – 412 с.
4. Системы управления ракет-носителей : учеб. пособие / В. В. Бурмистров [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2014. – Ч. 1. – 143 с.
5. Изделие 14А14. Состав и структура : пояснительная записка [ШЮГИ 460102.311ИД22.6.1]. – Самара, 2004. – 130 с.
6. Метод расчета программы управления движением космического аппарата с двигателем ограниченной тяги при решении задач межорбитальных перелетов / В. И. Горбулин [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 689. – С. 187–196.
7. Груздев Н. В., Михайлов М. Ю., Кротова Л. В. Методика предполетного оценивания энергомассовых характеристик ракеты космического назначения // Информация и Космос. – 2020. – № 4. – С. 135–139.

А. В. Зубков;
И. В. Фоминов
доктор технических наук, профессор

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОГРЕШНОСТИ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Представлены результаты исследования влияния линейных колебаний корпуса ракеты-носителя (РН) на точность определения навигационных параметров бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Показано, что влияние продольных и поперечных вибраций приводит к возникновению систематических погрешностей акселерометров и существенному росту ошибок определения навигационных параметров РН. Разработаны предложения по снижению уровня ошибок БИНС на основе использования адаптивных инерциальных приборов и алгоритмов БИНС.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, ракета-носитель, вибрационные возмущения, адаптация.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях создания и наращивания многоспутниковых орбитальных группировок (ОГ) малых космических аппаратов (МКА) возникает проблема рационального выбора средства выведения, удовлетворяющего требованиям по массе выводимой полезной нагрузки на заданную орбиту и по минимизации экономических затрат на решение этой задачи. Если задача развертывания ОГ МКА решается с помощью пакетного (группового) выведения МКА с использованием существующих РН тяжелого и среднего класса, то использование РН такого типа для выполнения задачи восполнения ОГ МКА существенно увеличивает стоимость эксплуатации многоплоскостной ОГ, что снижает экономический эффект от ее применения [1]. Создание и применение РН сверхлегкого класса позволят минимизировать энергетические и экономические затраты на выведение МКА при условии, что такие средства выведения удовлетворяют вышеуказанным требованиям. Опыт создания РН сверхлегкого класса в нашей стране и за рубежом [2] свидетельствует о необходимости пересмотра принципа построения их систем управления. В частности, предлагаются реализация принципа «лифтирования» и переход от систем с гиросtabilизированной платформой на бесплатформенные системы. При этом известно [3], что БИНС более подвержены воздействию перегрузки, вибраций, угловых колебаний основания, в силу их жесткой фиксации на корпусе РН.

Проблеме оценивания и минимизации влияния вибрационных возмущений на функционирование БИНС и инерциальных приборов в частности посвящены работы [4, 5]. В этих работах отмечается, что перекрестное влияние гармонических возмущений приводит к появлению систематических погрешностей акселерометров и гироскопов. А это, в свою очередь, непосредственно влияет на точность определения параметров ориентации и навигации РН. В работе [6] указано на необходимость учета вибрационных помех при выборе шага интегрирования кинематических уравнений в алгоритмах БИНС, что позволяет отфильтровать вредное влияние вибраций на полезный сигнал от инерциальных приборов. Кроме этого, работа [7] подтверждает результаты работы [6]. В статье [7] рассматривается возникновение погрешностей датчиков угловых скоростей вследствие рассинхронизации в измерительных трактах. Анализ телеметрической информации с различных РН свидетельствует о нестационарном характере изменения параметров вибраций на различных участках полета, что

усложняет задачу фильтрации высокочастотных помех. Работы, посвященные оцениванию влияния этих возмущений на ошибки выработки параметров ориентации и навигации РН, практически отсутствуют в силу того, что на летательных аппаратах этих типов чаще всего используется гиостабилизированная платформа. Это обуславливает актуальность проведения подобных исследований и необходимость разработки технических предложений по учету нестационарных вибраций, оказывающих влияние на точность выработки навигационных параметров БИНС РН.

АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАКЕТУ-НОСИТЕЛЬ ВО ВРЕМЯ ПОЛЕТА

Основной причиной возникновения вибраций на борту РН является пульсация жидкостных реактивных двигателей, а также воздействие аэродинамических сил при прохождении через плотные слои атмосферы. Известно, что с ростом частоты колебания становятся менее интенсивными и локализуются в более узком диапазоне. При этом низкочастотные колебания (в пределах 50 Гц), которые характерны для первых мод продольных колебаний, охватывают весь корпус и оказывают воздействие практически на все составные части РН, в том числе и на БИНС, установленную жестко на корпусе РН [8].

Жидкостный ракетный двигатель РН является основным источником высокоамплитудной низкочастотной вибрации. Именно он передает вибрационную нагрузку всей РН. В полной мере частота автоколебаний РН зависит от частоты собственных продольных колебаний корпуса ракеты. Амплитуда колебаний определяется как динамическими свойствами корпуса, так и соотношениями между свойствами всех элементов всей РН.

На рис. 1 представлены временные зависимости изменения частот собственных продольных колебаний РН «Союз-2.1в». Из графиков видно, что вибрационная нагрузка на корпус РН в течение полета изменяется.

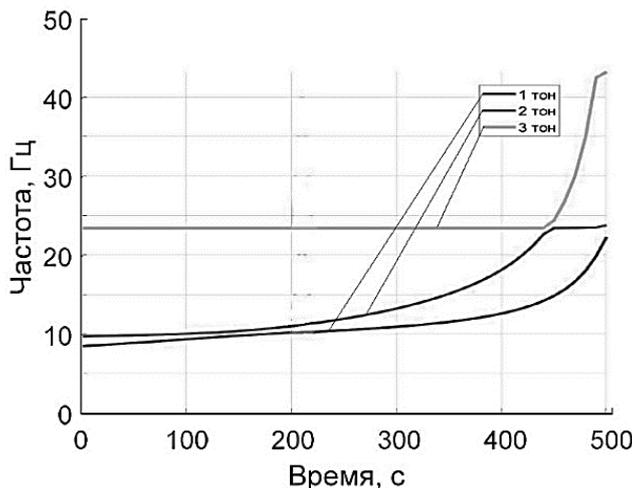


Рис. 1. Спектрограмма продольных колебаний корпуса РН «Союз-2.1в»

Как показывают исследования [9], полетные пульсации двигателя по амплитуде также не постоянны и зависят от времени и частоты.

Существуют значительные различия в характере вибрационных нагрузок на элементы РН в разных местах вдоль продольной оси [10]. Однако на корпус РН в полете воздействует не только вибрация, обусловленная пульсацией тяги ракетных двигателей. Воздействие аэродинамических сил оказывает не меньшее влияние на возникновение вибраций корпуса РН.

На рис. 2 представлен фрагмент телеметрической информации (ТМИ) РН «Союз-2.1в», снятой с датчиков, жестко закрепленных на корпусе РН в районе межбакового отсека III ступени.

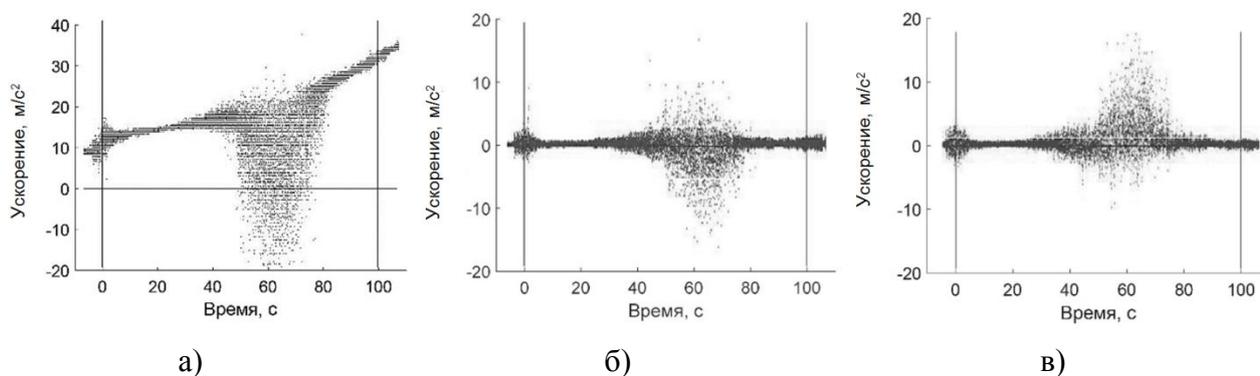


Рис. 2. Вибрационные нагрузки на корпус РН «Союз-2.1в»:
 а – осевое ускорение, параллельно продольной оси РН; б – боковое ускорение;
 в – нормальное ускорение

На графике ТМИ видно, что в период с 40-й по 80-ю секунду полета (рис. 3), который характеризуется прохождением участка с максимальным скоростным напором, на корпус РН (в продольном направлении) действует максимальная вибрационная нагрузка, которая не подвергается аналитическому описанию.

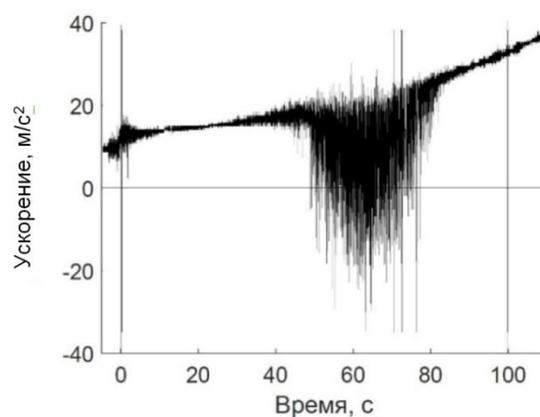


Рис. 3. Действия вибровозмущений, вызванных аэродинамической силой на участке максимальных скоростных нагрузок (40–80-я секунда полета)

Очевидно, что все вышеуказанные возмущения будут зашумлять полезный сигнал акселерометров. В частности, можно привести пример, когда методическая погрешность маятникового акселерометра растет вследствие одновременного появления совокупности факторов: достижения значения измеряемого ускорения n_x , близкого к пределу измерения, и появления ускорения n_y по оси, перпендикулярной оси чувствительности, а также появления угловых ускорений $\dot{\omega}_z$. При этом учесть эти погрешности сложно в силу отсутствия прямых (явных) измерений составляющих n_y и $\dot{\omega}_z$.

До настоящего времени основным источником информации о динамических характеристиках корпуса ракет служили данные наземных стендовых испытаний ракет. Несмотря

на широкие возможности современных стендов и измерительного оборудования, известны серьезные объективные ограничения, влияющие на достоверность таких исследований [11].

По указанной причине возмущающие факторы, вызванные изменяющимися во времени условиями полета РН, требуют учета и дальнейшего исследования влияния этих факторов на ошибки определения параметров ориентации и навигации БИНС летательного аппарата.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходной информации примем, что БИНС включает акселерометры и датчики угловых скоростей (ДУС), ориентированные по осям связанной системы координат РН. В этом случае первичной навигационной информацией БИНС являются вектор кажущегося ускорения \mathbf{n} и вектор абсолютной угловой скорости вращения $\boldsymbol{\omega}$ РН. Тогда вектор навигационных параметров, вырабатываемый БИНС, можно условно записать в виде функции

$$[\mathbf{R}(t), \mathbf{V}(t)]^T = f_{\text{БИНС}}(\mathbf{n}, \boldsymbol{\omega}, \mathbf{g}(h), t), \quad (1)$$

где \mathbf{R} – радиус-вектор РН;
 \mathbf{V} – вектор скорости РН;
 $\mathbf{g}(h)$ – гравитационное ускорение, зависящее от высоты полета h .

Модель ошибок определения навигационных параметров РН, получаемых БИНС, запишем в виде функции, зависящей от погрешностей инерциальных приборов:

$$[\Delta\mathbf{R}(t), \Delta\mathbf{V}(t)]^T = \Delta f_{\text{БИНС}}(\boldsymbol{\varepsilon}, \delta\mathbf{a}, \mathbf{W}_B, t), \quad (2)$$

где $\Delta\mathbf{R}, \Delta\mathbf{V}$ – векторы ошибок определения навигационных параметров,
 $\boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор смещений нуля ДУС;
 $\delta\mathbf{a}$ – вектор смещений нулей акселерометров;
 \mathbf{W}_B – вектор вибрационных возмущений, действующих на корпус РН.

Примем ряд допущений в ходе исследования:

- инструментальные погрешности измерительного канала акселерометров и ДУС отсутствуют, т. е. $\boldsymbol{\varepsilon} = 0, \delta\mathbf{a} = 0$;
- в работе рассматривается влияние вибрационных возмущений на функционирование акселерометров, влияние вибрации на сигнал гироскопов ДУС не рассматривается;
- нестационарные вибрационные возмущения действуют в произвольном направлении;
- влияние изменения температуры окружающей среды не рассматривается.

В качестве вибрационных возмущений, действующих на корпус РН, рассматриваются периодические колебания вида

$$\mathbf{W}_B = \mathbf{A}_B \sin(\boldsymbol{\omega}_B t), \quad (3)$$

где \mathbf{A}_B – амплитуда колебательного движения;
 $\boldsymbol{\omega}_B$ – круговая частота,

$$\boldsymbol{\omega}_B = 2\pi f_B,$$

где f_B – частота колебаний.

С учетом выражений (2) и (3) задача исследования сводится к определению численных зависимостей:

$$\Delta\mathbf{R} = f_r(A_B, f_B, t); \quad \Delta\mathbf{V} = f_v(A_B, f_B, t). \quad (4)$$

В качестве метода исследования воспользуемся методом математического моделирования.

МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Пусть на основании БИНС РН, с которым жестко связан акселерометр (рис. 4), действуют линейные вибрации вдоль некоторой оси L , находящейся в плоскости XOY связанной с РН системы координат, не совпадающей ни с продольной осью OX , ни с поперечной осью OY . Такую вибрацию иногда называют «косой» вибрацией.

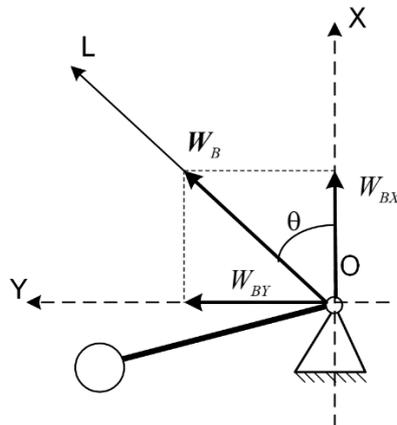


Рис. 4. Направление «косой» вибрации

Пусть ось L составляет угол θ с осью OX , который будем считать постоянным, при этом вибрацию будем считать моногармонической, как в выражении (3).

Проекции «косой» вибрации на соответствующие оси будут иметь вид:

$$W_{BX} = A_X \sin(\omega_B t), \quad W_{BY} = A_Y \sin(\omega_B t), \quad (5)$$

где амплитуды колебаний вычисляются по формулам:

$$A_X = A_B \cos \theta, \quad A_Y = A_B \sin \theta. \quad (6)$$

Как показано в работе [12], линейные гармонические вибрационные возмущения приводят к появлению постоянной составляющей погрешности акселерометра ΔW_B , которая относится к методическим погрешностям:

$$\Delta W_B = \frac{1}{2} k A_X A_Y A(\omega_B) \cos(\varphi(\omega_B)), \quad (7)$$

где k – коэффициент передачи акселерометра;
 $A(\omega_B)$ – амплитудно-частотная характеристика акселерометра;
 $\varphi(\omega_B)$ – фазочастотная характеристика акселерометра, причем

$$A(\omega_B) = \frac{1}{\sqrt{(1 - T^2 \omega_B^2)^2 + (2T\xi\omega_B)^2}}; \quad \varphi(\omega_B) = \arctg \frac{2T\xi\omega_B}{1 - T^2 \omega_B^2}. \quad (8)$$

где T – постоянная времени акселерометра,
 ξ – коэффициент демпфирования акселерометра.

Из анализа выражения (7) можно сделать вывод, что погрешность ΔW_B зависит от направления вибрации, так как с учетом формулы (6) оно принимает вид

$$\Delta W_B = \frac{1}{4} k A_B^2 \sin(2\theta) A(\omega_B) \cos(\varphi(\omega_B)). \quad (9)$$

Очевидно, что погрешность максимальна при $\theta = 45^\circ$.

Для перехода к триаде ортогональных акселерометров возможно допустить, что вектор вибрационных возмущений задается своими проекциями на соответствующие оси, т. е.

$\Delta W_B = [\Delta W_B^X, \Delta W_B^Y, \Delta W_B^Z]$, тогда, обозначив амплитуду «боковой» составляющей вибрации для каждой оси OX , OY и OZ как A_N^X, A_N^Y, A_N^Z соответственно, с учетом формулы (4) получим:

$$\begin{aligned}\Delta W_X^B &= \frac{1}{2} k A_X A_N^X A(\omega_B) \cos(\varphi(\omega_B)), \\ \Delta W_Y^B &= \frac{1}{2} k A_Y A_N^Y A(\omega_B) \cos(\varphi(\omega_B)), \\ \Delta W_Z^B &= \frac{1}{2} k A_Z A_N^Z A(\omega_B) \cos(\varphi(\omega_B)),\end{aligned}\quad (10)$$

где A_X, A_Y, A_Z – амплитуды вектора ΔW_B по соответствующим осям, а A_N^X, A_N^Y, A_N^Z – амплитуды, которые вычисляются по формулам:

$$A_N^X = \sqrt{A_Y^2 + A_Z^2}, A_N^Y = \sqrt{A_X^2 + A_Z^2}, A_N^Z = \sqrt{A_X^2 + A_Y^2}. \quad (11)$$

Для оценивания постоянной составляющей погрешности акселерометра ΔW_B , вследствие воздействия вибрационных возмущений (10), приняты следующие значения параметров маятникового акселерометра и вибраций: коэффициент передачи акселерометра $k = 0,1$; постоянная времени акселерометра $T = 0,05$ с; коэффициент демпфирования акселерометра $\xi = 0,136$; амплитуда вибрационного ускорения $A_B = g$; частота колебаний $f_B = 50$ Гц. Расчетное соотношение составило $\Delta W_B = 0,0014g$, что соответствует экспериментальным значениям, приведенным в работах [13, 14].

МОДЕЛЬ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Оценим ошибки параметров навигации и ориентации (5) на основе численного моделирования процесса функционирования БИНС РН. Алгоритмы БИНС подробно описаны в работах как отечественных, так и зарубежных авторов, например в [15–17].

Для проведения моделирования была разработана модель [18], представленная на рис. 5.

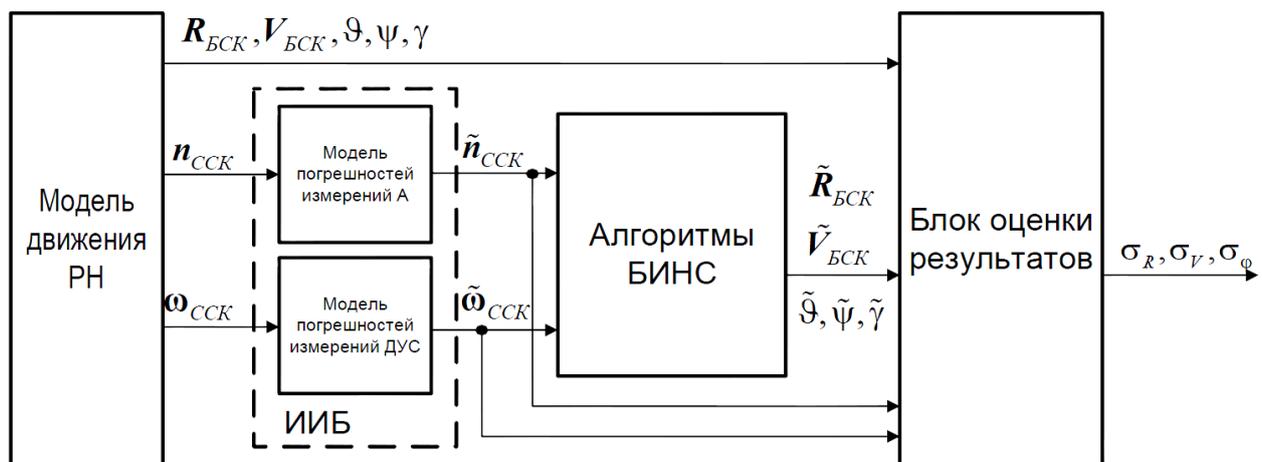


Рис. 5. Модель функционирования БИНС РН, где БСК – базовая система координат, ССК – связанная система координат, ИИБ – инерциальный измерительный блок

В блоке «Модель движения РН» формируется необходимая для функционирования БИНС и дальнейшего оценивания его точности траекторная информация, в состав которой входят:

время t , радиус-вектор положения центра масс изделия $\mathbf{R}_{\text{БСК}}$ в БСК, вектор скорости центра масс изделия $\mathbf{V}_{\text{БСК}}$, вектор угловой скорости объекта $\boldsymbol{\omega}_{\text{ССК}}$ в ССК, вектор кажущегося ускорения $\mathbf{n}_{\text{ССК}}$ и курсовые углы ϑ, ψ, γ . В качестве источника траекторных параметров объекта выступает модель движения РН, которая основана на интегрировании кинематических и динамических уравнений движения центра масс и углового движения объекта.

В ИИБ на основании выбранной модели погрешностей измерений инерциальных датчиков происходит формирование измеренных значений угловых скоростей $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{\text{ССК}}$ и кажущихся ускорений $\tilde{\mathbf{n}}_{\text{ССК}}$.

Формирование показаний акселерометров $\tilde{\mathbf{n}}_{\text{ССК}}$ с учетом действующих возмущений в виде вибрации происходит путем добавления к идеальным показаниям инерциального датчика слагаемого в виде постоянной составляющей погрешности акселерометра $\Delta \mathbf{W}_B$. Показания акселерометров рассчитываются на основании выражения (10):

$$\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{n} + \Delta \mathbf{W}_B. \quad (12)$$

В блоке «Алгоритмы БИНС» реализуются алгоритмы ориентации и навигации в базовой системе координат.

Путем интегрирования уравнения Пуассона вычисляется кватернион перехода от базовой к связанной системе координат:

$$2\dot{\Lambda}_{\text{БСК}}^{\text{ССК}} = \Lambda_{\text{БСК}}^{\text{ССК}} \circ \boldsymbol{\Omega}_{\text{ССК}} + \Lambda_{\text{БСК}}^{\text{ССК}} \left(1 - \|\Lambda_{\text{БСК}}^{\text{ССК}}\|\right), \quad (13)$$

где $\Lambda_{\text{БСК}}^{\text{ССК}}$ – кватернион перехода от базовой к связанной системе координат;

$\boldsymbol{\Omega}_{\text{ССК}}$ – кватернионное отображение вектора $\boldsymbol{\omega}_{\text{ССК}}$.

С помощью полученного кватерниона по формуле кватернионной алгебры преобразуют вектор кажущихся ускорений из ССК в БСК:

$$\mathbf{N}_{\text{БСК}} = \Lambda_{\text{БСК}}^{\text{ССК}} \circ \mathbf{N}_{\text{ССК}} \circ \bar{\Lambda}_{\text{БСК}}^{\text{ССК}}, \quad (14)$$

где \mathbf{N} – кватернионное отображение вектора $\tilde{\mathbf{n}}$ в соответствующей системе координат.

Затем, интегрируя основное уравнение инерциальной навигации в базовой системе координат с учетом начального значения вектора абсолютной скорости $\mathbf{V}_0^{\text{БСК}}$ и вектора гравитационного ускорения $\mathbf{g}_{\text{БСК}}$, получают вектор абсолютной скорости $\mathbf{V}_{\text{БСК}}$. Интегрируя вектор абсолютной скорости $\mathbf{V}_{\text{БСК}}$ с учетом начального радиуса-вектора $\mathbf{R}_0^{\text{БСК}}$ получим радиус-вектор $\mathbf{R}_{\text{БСК}}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{\text{БСК}}(t) &= \mathbf{V}_0^{\text{БСК}}(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} (\mathbf{n}_{\text{БСК}}(t) + \mathbf{g}_{\text{БСК}}(\mathbf{R})) dt; \\ \mathbf{R}_{\text{БСК}}(t) &= \mathbf{R}_0^{\text{БСК}}(t_0) + \int_{t_0}^{t_k} \mathbf{V}_{\text{БСК}}(t) dt. \end{aligned} \quad (15)$$

Оценка результатов моделирования и вычисление $\Delta \mathbf{R}$, $\Delta \mathbf{V}$ осуществляется в «Блоке оценки результатов» путем вычисления разности результатов моделирования идеальной (невозмущенной) работы БИНС и результатов, полученных с учетом действия вибрационных возмущений:

$$\Delta \mathbf{R} = \tilde{\mathbf{R}}_{\text{БСК}} - \mathbf{R}_{\text{БСК}}, \quad \Delta \mathbf{V} = \tilde{\mathbf{V}}_{\text{БСК}} - \mathbf{V}_{\text{БСК}}, \quad (16)$$

где $\tilde{\mathbf{R}}_{\text{БСК}}$, $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{БСК}}$ – значения с учетом действия вибрационных возмущений.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве объекта оценивания и источника траекторной информации выступает модель движения РН сверхлегкого класса, которая выводит полезную нагрузку на круговую орбиту Земли высотой 360 км. Время выведения – 500 секунд. Параметры нестационарных вибрационных возмущений, которые использовались в процессе моделирования, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры вибрационных возмущений

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Диапазон изменений
Частота колебаний	f_B	Гц	От 5 до 95
Амплитуда колебаний	A_B	м/с ²	От 2 до 20

Результаты моделирования представлены в графиках зависимостей на рис. 6.

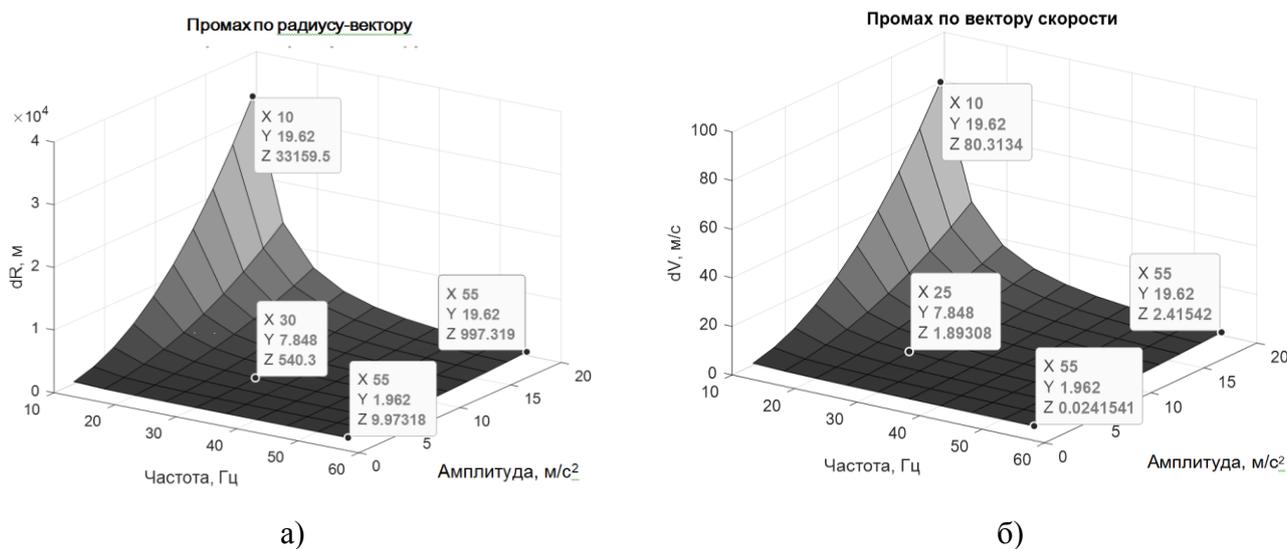


Рис. 6. Оценка точности определения навигационных параметров: а – по радиусу-вектору; б – по вектору скорости

Результаты моделирования показали, что увеличение амплитуды косых вибраций с одновременным уменьшением частоты приводит к росту систематической погрешности акселерометров и существенному увеличению ошибки определения радиуса-вектора (до 40 км) и вектора скорости (до 80 м/с). Моделирование проведено с учетом постоянства частоты и амплитуды на всем протяжении полета РН. В силу нестационарности вибраций ошибки определения навигационных параметров РН будут несколько меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов исследования позволяет сделать вывод, что нестационарные вибрации оказывают существенное влияние на точность функционирования БИНС, вызывая достаточно большие ошибки определения параметров навигации РН.

Решить проблему влияния нестабильности условий полета и порожденных ею возмущений возможно путем управления режимами функционирования инерциальных приборов с целью минимизации погрешностей, т. е. путем создания и применения спаренных адаптивных датчиков, которые посредством параметрической идентификации [19] возмущающих факторов позволят подбирать оптимальные характеристики в данном режиме полета РН, повышая тем самым точность работы БИНС [20–22].

По указанной причине важно обеспечить благоприятные условия работы инерциальных приборов посредством вариации их режимов функционирования, которые учитывают динамические условия полета РН.

Другим подходом к уменьшению ошибок БИНС РН, вызванных вибрациями, является разработка адаптивных алгоритмов, позволяющих учитывать как шаг интегрирования кинематических уравнений БИНС, так и компенсацию оценки систематических ошибок, полученных опытным путем.

Список используемых источников

1. *Остапенко О. Н., Баушев С. В., Морозов И. В.* Информационно-космическое обеспечение группировок войск (сил) ВС РФ : учебно-научн. пособие. – СПб. : изд-во «Любавич», 2012. – 368 с.
2. *Клюшников В. Ю.* Ракеты-носители сверхлегкого класса: ниша на рынке пусковых услуг и перспективные проекты // Воздушно-космическая сфера. – 2019. – № 3. – С. 58–71.
3. *Ватутин М. А., Клюшников А. И., Фоминов И. В.* Анализ особенностей применения бесплатформенных инерциальных навигационных систем в ракетах космического назначения легкого класса // Сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники». – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2018. – С. 23–28.
4. *Гаврилов А. А., Шипунов А. Н.* Виброустойчивость микромеханического акселерометра // Труды Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева. – 2013. – Вып. 3(100). – С. 308–315.
5. *Фролов А. В., Савватеев Д. О., Шаповалов П. А.* Модальный анализ модели БИНС с помощью пакета ANSYS // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – Вып. 11. – С. 36–52.
6. *Литманович Ю. А., Ву Ю.* Определение угловой ориентации в БИНС: сравнение традиционных подходов и метода функционального итеративного интегрирования // Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28, № 4. – С. 16–36.
7. *Фомичев А. В., Кузнецов А. Г.* О вычислительном дрейфе от рассинхронизации ДУС при вибрационных воздействиях на БИНС // Навигация и управление летательными аппаратами. – 2023. – № 42. – С. 19–28.
8. *Рабинович Б. И.* Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 1975. – 416 с.
9. *Жеребчиков С. Н.* Анализ вибрационных характеристик жидкостных ракетных двигателей с использованием иерархии математических моделей, оценка пульсационных нагрузок : дисс. канд. техн. наук. – М., 2005. – 125 с.
10. *Перфильев А. С., Султанов А. Э., Герасименко С. Ю.* Условия возникновения высокоамплитудных низкочастотных колебаний корпуса ракеты-носителя, снижающих надежность агрегатов двигательных установок // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – Вып. 7. – С. 391–399.
11. *Перфильев А. С., Султанов А. Э.* Подходы к оцениванию динамических параметров корпуса ракеты-носителя в полете по данным телеметрических измерений // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2020. – Вып. 673 – С. 212–221.

12. Командно-измерительные приборы / Б. И. Назаров [и др.]; под общ. ред. Б. И. Назарова. – М. : МО СССР, 1987. – 678 с.
13. Колбас Ю. Ю., Томилин А. В., Ладонкина М. В. Экспериментальные исследования погрешностей Q-FLEX и Si-FLEX акселерометров при механической вибрации // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер. : Приборостроение. – 2017. – № 3 – С. 13–19.
14. Коновалов С. Ф. Теория виброустойчивости акселерометров. – М. : Машиностроение, 1991. – 272 с.
15. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009. – 280 с.
16. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – 280 с.
17. Мелешко В. В., Нестеренко О. И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы : учеб. пособие. – Кировоград : ПОЛИМЕД-Сервис, 2011. – 164 с.
18. Свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667662. Программа оценивания погрешности определения параметров навигации и ориентации ракеты-носителя в полете с учетом применения бесплатформенной инерциальной навигационной системы в условиях влияния нестационарных вибрационных возмущений / Зубков А. В. (RU). – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.07.2024.
19. Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления. – Самара : Самарск. гос. техн. ун-т, 2009. – 136 с.
20. Миронов В. И., Фоминов И. В., Малетин А. Н. Метод автономной косвенной идентификации коэффициента преобразования маятникового компенсационного акселерометра в условиях орбитального полета космического аппарата // Труды СПИИРАН. – 2015. – Вып. 3(40) – С. 93–109.
21. Пелевин А. Е. Идентификация параметров модели объекта в условиях внешних возмущений // Гироскопия и навигация. – 2014. – Вып. 4(87) – С. 111–120.
22. Parameter identification and perturbation algorithm of parallel type six-axis accelerometer / J. You [et al.] // Zhendong yu Chongji. – 2019. – Vol. 38, № 1. – P. 134–141.

А. Н. Калюта;

кандидат технических наук;

Г. Н. Мальцев,

доктор технических наук, профессор;

В. Л. Якимов,

доктор технических наук, доцент

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ АВТОНОМНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Рассмотрены принципы информационно-телеметрического обеспечения управления космическими аппаратами с высоким уровнем автономности. Обоснована необходимость использования для планирования циклов полного телеметрического контроля и поддержки принятия решений по управлению космическими аппаратами обобщенных параметров технического состояния бортовых систем и космических аппаратов в целом. Проведен сравнительный анализ способов формирования обобщенных параметров на основе формальных математических преобразований диагностических параметров, и предложено использование обобщенных параметров технического состояния космических аппаратов, формируемых на основе взвешенного суммирования.

Ключевые слова: космический аппарат, высокий уровень автономности, информационно-телеметрическое обеспечение, обобщенные параметры технического состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Современной тенденцией развития КА является повышение уровня их автономности на основе «интеллектуализации» бортовых комплексов управления КА [1]. Так, длительные интервалы автономного функционирования КА в целом и по отдельным бортовым системам являются характерной чертой нового поколения КА дистанционного зондирования Земли. Это относится, в частности, к функционированию бортовых систем контроля технического состояния и технического диагностирования в контуре автономного управления КА. В соответствии с принятыми технологическими циклами управления (ТЦУ) существенно увеличивается период передачи с космического аппарата на Землю полных потоков телеметрической информации (ТМИ), достигающий в штатных режимах функционирования нескольких суток и более [2].

В технологических циклах управления КА контроль технического состояния и техническое диагностирование бортовых систем выполняются наземными и бортовыми средствами системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО) [3]. Информационно-телеметрическое обеспечение управления КА включает операции обработки телеметрической информации (ТМИ) о состоянии бортовой аппаратуры, техническое диагностирование и прогнозирование технического состояния бортовых систем КА. Увеличение интервалов автономного функционирования КА существенно усложняет решение задачи технического диагностирования бортовых систем КА в наземном сегменте СИТО при увеличении интервалов времени между поступлением с КА полных потоков ТМИ. В настоящей статье рассмотрены принципы информационно-телеметрического обеспечения управления КА с высоким уровнем автономности с прогнозированием обобщенных параметров их технического состояния.

СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Поддержание в готовности орбитальных группировок КА и эффективное применение по назначению космических систем обеспечивается путем управления КА средствами наземных комплексов управления. Операции информационно-телеметрического обеспечения являются составной частью ТЦУ любого типа КА [3]. По результатам технического диагностирования оценивается функциональное состояние бортовых систем и планируются операции управления КА, обеспечивающие его применение по целевому назначению, а также парирование и предупреждение отказов бортовой аппаратуры. Поэтому решение задач информационно-телеметрического обеспечения оказывает значительное влияние на надежность функционирования КА и целевые показатели применения по назначению космических систем в целом.

Длительное функционирование КА без контроля технического состояния и технического диагностирования наземным сегментом СИТО приводит к увеличению априорной неопределенности технического состояния бортовых систем КА для Центра управления полетом (ЦУП) КА вследствие ряда причин:

- малого количества ТМИ, необходимой для технического диагностирования КА;
- объективного ограничения возможностей бортовых средств диагностирования и восстановления работоспособности бортовых систем КА;
- возможности пропусков отказов бортовым сегментом СИТО;
- возникновения в период автономного функционирования нештатных ситуаций.

В указанных условиях планирование в ЦУП КА циклов полного телеметрического контроля и других операций информационно-телеметрического обеспечения КА с высоким уровнем автономности функционирования, направленных на контроль технического состояния и техническое диагностирование бортовых систем КА, должно осуществляться, во-первых, исходя из принятого ТЦУ КА, во-вторых, с учетом прогнозирования технического состояния бортовых систем КА и КА в целом на интервале времени между сеансами управления КА, в которых происходит передача на Землю полных потоков ТМИ.

Принцип поддержания высокой надежности функционирования КА с учетом проведения циклов полного телеметрического контроля показан на рис. 1, на котором качественно показано изменение во времени t вероятности безотказной работы КА $P_{БР}$ при различных вариантах выбора периода полного телеметрического контроля. Величина $P_{БР}$ рассматривается как функция интервалов времени между циклами полного телеметрического контроля.

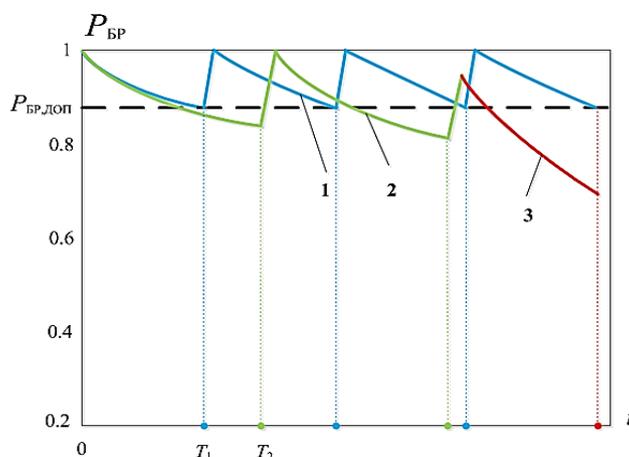


Рис. 1. Изменение во времени вероятности безотказной работы КА при различных вариантах выбора периода полного телеметрического контроля

Кривая 1 соответствует случаю, когда период полного телеметрического контроля T_1 согласован с допустимым снижением вероятности безотказной работы КА $P_{БР доп}$. Полагается, что после проведения полного телеметрического контроля возможно восстановление надежности функционирования КА до максимально возможного уровня вероятности $P_{БР}$. Кривая 2 соответствует случаю, когда период полного телеметрического контроля T_2 не согласован с допустимым снижением вероятности безотказной работы КА $P_{БР доп}$, и появляются интервалы времени, в течение которых надежность функционирования КА ниже допустимой. Кривая 3 соответствует случаю, когда период полного телеметрического контроля T_2 не согласован с допустимым снижением вероятности безотказной работы КА $P_{БР доп}$, и возникает «тяжелая» нештатная ситуация, не позволяющая полностью восстановить надежность функционирования КА после проведения цикла полного телеметрического контроля.

Особенностью процесса технического диагностирования бортовых систем КА с высоким уровнем автономности является необходимость использования обобщенных параметров их технического состояния в целом в сочетании с расширением множества учитываемых технических состояний. Использование обобщенных параметров необходимо для сопоставления результатов диагностического контроля с различными множествами технических состояний и принятия решений по управлению техническим состоянием и применению КА с требуемой эффективностью. В качестве обобщенных параметров могут выступать: результаты различного рода преобразований значений контролируемых параметров, характеристики бортовых систем КА, непосредственно номер вида технического состояния. Общими требованиями к выбору обобщенных параметров являются адекватность характеристики технического состояния КА в целом и возможность прогнозирования на интересующих временных интервалах.

Использование обобщенных параметров для решения задач анализа технического состояния КА соответствует современной концепции управления функционированием сложных технических систем как робототехнических комплексов с высокой степенью автономности функционирования. В общем случае обобщенные параметры технического состояния должны удовлетворять требованиям как разработчиков технических систем, так и специалистов по эксплуатации. Желаемыми свойствами обобщенных параметров технического состояния КА являются: соответствие значений обобщенных параметров реальному техническому состоянию; медленно меняющийся характер изменения обобщенных параметров, допускающий возможность прогнозирования их значений во времени на длительное время упреждения прогноза; распределение значений обобщенных параметров в пределах допусков, соответствующих техническому состоянию бортовых систем КА, близкому к нормальному; возможность определения по значениям обобщенных параметров моментов времени, соответствующих изменению технического состояния КА.

При обработке диагностической информации используются несколько подходов к формированию обобщенных параметров контролируемых технических систем [4]. Среди них можно выделить две большие группы: способы, основанные на анализе физических процессов функционирования технической системы, и способы, основанные на формальных математических преобразованиях исходных диагностических параметров технической системы. Обобщенные параметры, основанные на анализе физических процессов функционирования, ориентированы на оценку технического состояния конкретных технических систем. Такие обобщенные параметры не обладают универсальностью, необходимой для решения задач оценки и прогнозирования технического состояния сложных технических систем, включающих большое число разнородных подсистем, с целью управления их применением. Поэтому в качестве универсального подхода к формированию обобщенных параметров технического состояния КА рассматривался подход, основанный на формальных математических преобразованиях исходных диагностических (телеметрируемых) параметров КА.

В табл. 1 представлена характеристика используемых в настоящее время способов формирования обобщенных параметров сложных технических систем на основе формальных мате-

математических преобразований диагностических параметров. К ним относятся следующие способы: на основе аналитических выражений; на основе взвешенного суммирования; на основе логических преобразований; на основе биективных преобразований; на основе описания аттрактора динамической системы. Исходную информацию для разработки математического аппарата преобразований получают экспертными методами и по результатам испытаний и экспериментальной отработки контролируемых технических систем.

Таблица 1

**Сравнительный анализ способов формирования обобщенных параметров
технического состояния сложных технических систем**

№ п/п	Способ формирования	Уровень применения	Примеры	Основные недостатки
1	На основе аналитических выражений	Модули	Деградация источника питания	Необходимость исследования модулей технической системы
2	На основе взвешенного суммирования	Модули	Деградация усилителя мощности	Трудность в определении весовых коэффициентов
3	На основе биективных преобразований	Подсистемы	Уплотнение сигнальных параметров	Не применим к функциональным параметрам
4	На основе логических преобразований	Модули	Номер вида технического состояния	Низкая чувствительность к изменениям технического состояния
5	На основе описания аттрактора	Функциональные системы	Показатель Херста, корреляционная энтропия	Необходимость большого количества отсчетов параметров

В ходе предварительных исследований был выбран способ формирования обобщенных параметров технического состояния КА на основе взвешенного суммирования. В качестве базовых операций для формирования обобщенных параметров технического состояния КА были выбраны операции взвешенного суммирования, нелинейного преобразования и сглаживания. Выбор базиса используемого преобразования осуществляется с учетом особенностей анализируемых бортовых систем КА и КА в целом, физических процессов и конкретных условий их функционирования и решаемых задач технического диагностирования. В качестве общей основы формирования обобщенных параметров технического состояния КА на базе формальных математических преобразований можно использовать метод группового учета аргументов [5]. Метод предназначен для решения различных задач обработки экспериментальных данных и реализуется с помощью параметрических (полиномиальных) и непараметрических (использующих кластеризации или аналоги) алгоритмов.

В большинстве алгоритмов метода группового учета аргументов при обработке экспериментальных данных используется их полиномиальная свертка. Для формирования обобщенных параметров технического состояния КА в качестве базисных функций могут быть использованы полиномы Колмогорова – Габора второго порядка. Формирование обобщенного параметра технического состояния КА осуществляется на основе множества контролируемых параметров $x_i, i=1,2,\dots,M$. Их объединение при формировании обобщенного параметра X осуществляется в соответствии с выражением

$$X(x_1, x_2, \dots, x_M) = a_0 + \sum_{i=1}^M a_{1i} x_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_{2ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где a_0, a_{1i}, a_{2ij} – коэффициенты полиномов нулевого, первого и второго порядка соответственно, с помощью которых осуществляется свертка исходных значений параметров x_i ,

$i=1,2,\dots,M$, при формировании обобщенного параметра X . При этом в качестве значений параметров x_i могут быть использованы значения исходных телеметрируемых параметров или обобщенных параметров предыдущего уровня иерархии описания бортовых систем КА.

Выражение (1) представляет собой модель формирования на определенном уровне описания функционирования технической системы обобщенного параметра ее технического состояния с использованием полиномов Колмогорова – Габора. Важными достоинствами использования полиномов Колмогорова – Габора для формирования обобщенных параметров технического состояния сложных технических систем и унифицированного описания процессов их функционирования являются, с одной стороны, относительная простота и малое количество компонентов, с другой стороны, возможность учета нелинейности и взаимного влияния параметров технической системы. Подбор коэффициентов преобразования значений контролируемых параметров в обобщенные параметры осуществляется итерационными методами с использованием алгоритмов оптимизации и настройки (обучения) модели. Однако это не является ограничением использования метода группового учета аргументов, поскольку подбор коэффициентов и обучение моделей осуществляются на этапе создания технической системы, в рассматриваемом случае – КА.

Для реализации формирования обобщенных параметров технического состояния КА по множеству телеметрируемых параметров также могут быть использованы многослойные нейронные сети, позволяющие учесть нелинейный характер изменения телеметрируемых параметров и сформированных обобщенных параметров технического состояния, а также взаимное влияние их друг на друга. На рис. 2,а представлена структурная схема четырехслойной нейронной сети для формирования обобщенных параметров технического состояния КА l -го уровня, где $n_1, n_2, n_3, n_4 = 1$ – количество нейронов в слоях нейронной сети. Многослойная нейронная сеть включает следующие параметры: весовые коэффициенты матриц $W_1=[w_{1,i_1,i_2}]$, $W_2=[w_{2,i_2,i_3}]$, $W_3=[w_{3,i_3,i_4}]$, векторы постоянных смещений $C_1=[c_{1,i_2}]$, $C_2=[c_{2,i_3}]$, $C_3=[c_{3,i_4}]$, где i_1, i_2, i_3 – номера нейронов в каждом слое нейронной сети.

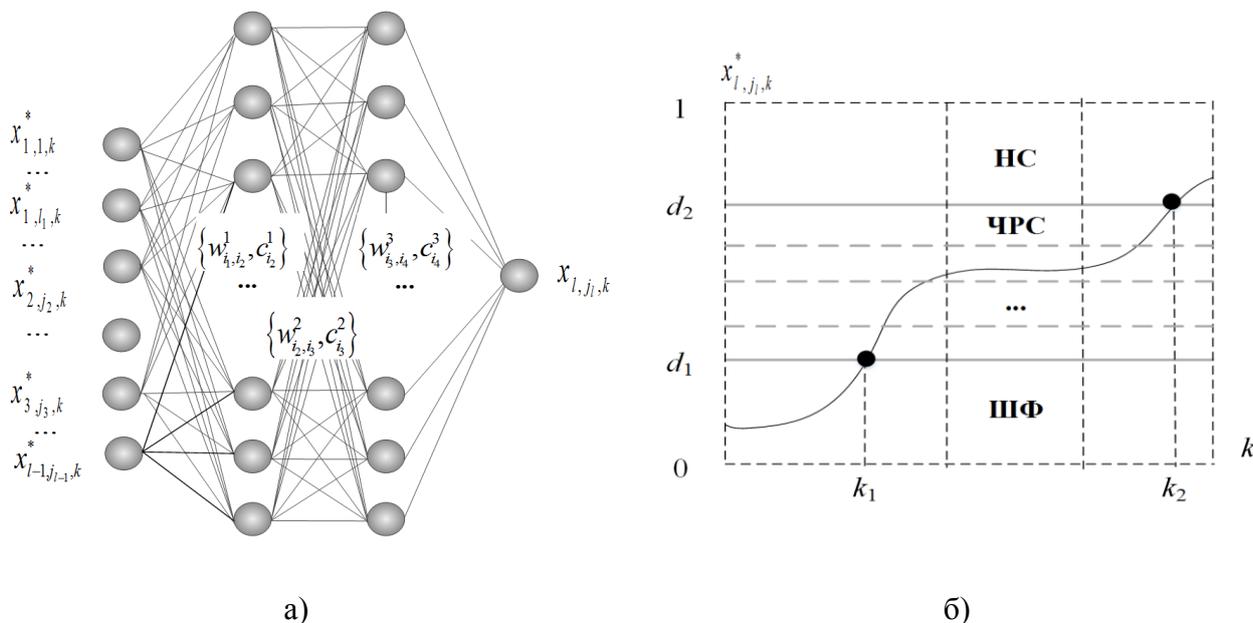


Рис. 2. Многослойная нейронная сеть для формирования обобщенных параметров технического состояния КА (а) и пример изменения обобщенного параметра (б), где НС – нештатная ситуация; ЧРС – частично работоспособное состояние; ШФ – штатное функционирование

На входе сети (первый внешний слой) действуют отфильтрованные значения телеметрируемых параметров $\{x_{1,j_1,k}^*\}$ и/или обобщенных параметров технического состояния более низкого уровня иерархии $\{x_{l,j_l,k}^*\}$, $l \geq 2$, где j_1 – номер параметра, k – номер дискретного момента времени, соответствующего отсчету параметра. В двух скрытых слоях, в соответствии с введенным множеством значений коэффициентов $\{w_{i_1,i_2}^1, c_{i_2}^1\} \cup \{w_{i_2,i_3}^2, c_{i_3}^2\} \cup \{w_{i_3,i_4}^3, c_{i_4}^3\}$, осуществляется формирование значений обобщенного параметра, которое поступает на выход второго внешнего слоя.

Значения нейронов на выходе каждого слоя сети имеют следующий вид:

$$x_{2,i_2,k} = f\left(\sum_{i_1=1}^{n_1} w_{1,i_1,i_2} x_{1,i_1,k} + c_{1,i_2}\right), x_{3,i_3,k} = f\left(\sum_{i_2=1}^{n_2} w_{2,i_2,i_3} x_{2,i_2,k} + c_{2,i_3}\right), x_{4,n_4,k} = f\left(\sum_{i_3=1}^{n_3} w_{3,i_3,n_4} x_{3,i_3,k} + c_{3,n_4}\right), \quad (2)$$

где x_{4,n_4} – выходное значение сети, представляющее собой значение обобщенного параметра X текущего уровня иерархии;

f – нелинейная функция активации нейронов, например сигмоидной функции.

Весовые коэффициенты сети, входящие в выражение (2), определяются в процессе ее обучения на обучающих, проверочных и тестовых данных, формируемых экспертом с использованием допусков.

На рис. 2,б приведен пример изменения обобщенного параметра $x_{l,j_l,k}^*$ в зависимости от номера временного отсчета k с переходом из области ШФ через область ЧРС в область НС. Расширенное пространство технических состояний КА образуется дополнением работоспособного и неработоспособного состояний частично работоспособным состоянием. В частично работоспособном состоянии КА правильно функционирует при выполнении отдельных функций, что соответствует используемому в практике летной эксплуатации КА режиму применения КА с ограничениями.

Обобщенные параметры технического состояния могут быть связаны с показателями надежности бортовых систем КА и использованы при реализации принципа поддержания высокой надежности функционирования КА, показанного на рис. 1. Для этого в ЦУП КА алгоритмически осуществляются формирование и прогнозирование обобщенных параметров технического состояния КА с выдачей результатов в систему поддержки принятия решений по управлению КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ технического состояния КА по данным телеметрического контроля является одной из наиболее важных операций в ТЦУ КА. Особое значение анализ технического состояния КА приобретает при высоком уровне их автономности, когда периодичность передачи на Землю полных потоков ТМИ в штатных режимах функционирования составляет несколько суток и более.

При реализации ТЦУ КА с высоким уровнем автономности необходимо прогнозирование технического состояния бортовых систем КА и их критических параметров на интервале времени между сеансами управления КА, в которых происходит передача на Землю полных потоков ТМИ.

Прогнозирование технического состояния бортовых систем КА делает гибкими реализуемые ТЦУ КА и позволяет осуществлять планирование операций полного телеметрического контроля КА с учетом его текущего и прогнозируемого технического состояний, что в конечном итоге обеспечивает надежное функционирование бортовой аппаратуры КА и эффективное выполнение КА задач по целевому назначению.

Список используемых источников

1. *Микрин Е. А.* Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 336 с.
2. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А. Н. Кириллин [и др.]. – М. : Машиностроение, 2010. – 384 с.
3. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса / Ю. С. Мануйлов [и др.]; под ред. Ю. С. Мануйлова. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010. – 609 с.
4. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М. : Наука, 2006. – 408 с.
5. *Ивахненко А. Г. Юрачковский Ю. П.* Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. – М. : Радио и связь, 1987. – 116 с.

С. С. Камчалов;
В. В. Карагодин,
доктор технических наук, профессор;
Д. В. Рыбаков,
кандидат технических наук

МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Опыт эксплуатации систем электроснабжения (СЭС) объектов военной инфраструктуры (ОВИ) в условиях проведения специальной военной операции показывает необходимость обеспечения оперативного управления СЭС и режимами работы ее основного электрооборудования в зависимости от сложившейся обстановки. Анализ работоспособности СЭС и выработка управляющих воздействий в этих условиях невозможны без проведения математических расчетов по определению параметров основного оборудования в различных режимах работы электрической сети. В статье предложен подход к построению СЭС, обеспечивающий повышение надежности электроснабжения потребителей в различных режимах функционирования потребителей ОВИ. Для оценивания параметров СЭС ОВИ разработаны математические модели, учитывающие особенности электроснабжения потребителей ОВИ как от системы внешнего электроснабжения (системы, энергоснабжающей организации), так и от резервного (автономного) источника электрической энергии.

Ключевые слова: система электроснабжения, математическая модель, объект военной инфраструктуры, параметры системы, режим функционирования.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт проведения специальной военной операции показал, что на современном этапе развитие систем вооружения должно быть направлено прежде всего на повышение их боевой устойчивости в условиях возможного применения вероятным противником современных средств поражения. Решение данной задачи напрямую связано с необходимостью повышения надежности и живучести СЭС, обеспечивающих электрической энергией техническое и технологическое оборудование ОВИ и являющихся первоочередной целью для противника.

Необходимые в данных условиях модернизация и реконструкция СЭС в первую очередь должны быть ориентированы на изменение подходов к построению СЭС ОВИ и обеспечение возможности адаптации режимов работы ее основного электрооборудования к сложившимся условиям обстановки. Это требует проведения исследования таких систем в различных режимах функционирования, что невозможно без предварительных математических расчетов параметров оборудования электрической сети, эффективность которых существенно возрастает с применением современных методов математического моделирования [1]. В результате возникает необходимость разработки математических моделей СЭС, которые позволят оценить ее эффективность в различных режимах функционирования потребителей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Идеология построения СЭС большинства ОВИ космических войск разработана в период их создания и за время эксплуатации практически не пересматривалась. Проектирование и создание СЭС ОВИ основываются на нормах и правилах, применяемых для СЭС общепромышленных объектов с учетом лишь некоторых технологических особенностей ОВИ. При этом требования по живучести и защищенности СЭС, как «военных объектов», не учитываются [2, 3].

Кроме того, отсутствует и методический аппарат, который позволил бы учесть данные требования при проектировании и создании СЭС ОВИ и обеспечить их выполнение в процессе эксплуатации. Это приводит к возрастанию вероятности отказа систем электроснабжения в условиях воздействия вероятного противника, что в современных условиях недопустимо.

В основу развития и совершенствования СЭС ОВИ в современных условиях может быть положен подход к построению и эксплуатации СЭС с использованием принципа трехуровневой структуры (рис. 1).

РЕЖИМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ							
Режим повседневного функционирования				Режим боевого функционирования			
Система (подсистема) внешнего электроснабжения ОВИ		Система (подсистема) внутреннего электроснабжения ОВИ		Система (подсистема) гарантированного электроснабжения ОВИ			
ЛЭП	ТП	РЭС	Резервные электростанции	АИЭЭ	РЭС	СБЭ	
ПОТРЕБИТЕЛИ ОБЪЕКТА ВОЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ							

Рис. 1. Режимы функционирования СЭС ОВИ, где ЛЭП – линии электропередачи, ТП – трансформаторная подстанция, РЭС – распределительные электрические сети, АИЭЭ – автономные источники электрической энергии, СБЭ – системы бесперебойного электроснабжения

В соответствии с данным принципом в зависимости от режима функционирования ОВИ в состав его СЭС должны входить три основные подсистемы: система (подсистема) внешнего электроснабжения ОВИ; система (подсистема) внутреннего электроснабжения ОВИ; система (подсистема) гарантированного электроснабжения ОВИ (специального фортификационного сооружения). Каждая из них включает электротехническое оборудование, обеспечивающее их функциональное предназначение.

Так, система (подсистема) внешнего электроснабжения ОВИ, обеспечивающая связь с государственной или региональной электроэнергетической системой в режиме повседневного функционирования (боевого дежурства), в качестве основных элементов включает питающие линии электропередачи и трансформаторные подстанции (пункты приема электроэнергии).

Система (подсистема) внутреннего электроснабжения ОВИ, обеспечивающая электроснабжение потребителей ОВИ при плановых или аварийных отключениях системы внешнего электроснабжения, включает в себя распределительные электрические сети и резервные электростанции.

Система (подсистема) гарантированного электроснабжения ОВИ, предназначенная для обеспечения надежности и живучести электроснабжения потребителей, непосредственно выполняющих боевую задачу в условиях воздействия вероятного противника, имеет в своем составе защищенные автономные источники электрической энергии, РЭС и системы бесперебойного электроснабжения.

Основой данного принципа является обеспечение возможности адаптации режимов работы основного электрооборудования СЭС ОВИ к сложившимся условиям обстановки за счет резервирования как источников электрической энергии, так и распределительных электрических сетей и возможности выбора одного из вариантов структуры, обладающей необходимым уровнем живучести и эксплуатационной пригодности [4].

Обоснование, разработка и реализация данного подхода требуют предварительных математических расчетов параметров оборудования в различных режимах работы электрической сети [5], которые с наибольшей эффективностью возможно выполнить с помощью математического моделирования [6].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ РЕЖИМА ПОВСЕДНЕВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Система электроснабжения объекта военной инфраструктуры представляет собой совокупность электроустановок (элементов СЭС), предназначенных для обеспечения электрической энергией потребителей [3].

Математическую модель СЭС ОВИ можно представить в виде совокупности математических моделей отдельных ее элементов – силовых трансформаторов, генераторных агрегатов, линий электропередачи, устройств компенсации реактивной мощности, взаимосвязанных процессом производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии в различных режимах функционирования ОВИ. Для оценивания параметров СЭС в различных режимах функционирования ОВИ ее математическую модель необходимо дополнить математическими моделями потребителей.

Величины генерируемой и потребляемой мощностей, узловые напряжения, токи ветвей, потери в сети и другие величины в процессе передачи, распределения и потребления электрической энергии определяются режимом работы системы. При анализе и составлении математического описания рассматривают следующие режимы работы СЭС [7, 8]: нормальный установившийся режим, послеаварийный установившийся режим, переходный режим. Установившиеся режимы характеризуются параметрами, не изменяющимися во времени, нахождение которых сводится, как правило, к решению систем нелинейных алгебраических уравнений. Описание переходного режима, параметры которого изменяются во времени, осуществляется с помощью дифференциальных уравнений [6].

При управлении функционированием СЭС ОВИ для оценивания допустимости параметров элементов электрической сети, качества электрической энергии, для определения ее эксплуатационно-технических показателей необходимо знать параметры нормального установившегося режима, который принимается в качестве основного режима работы системы. Для применения современных методов математического моделирования при решении задач расчета установившихся режимов необходима достаточно полная и корректная математическая модель системы.

Рассмотрим СЭС ОВИ, построенную на основе предложенного принципа трехуровневой структуры.

В состав данной СЭС входят следующие основные элементы: высоковольтные линии электропередачи, понизительная трансформаторная подстанция, автономный источник электрической энергии, низковольтные линии электропередачи, снабжающие электрической энергией потребителей различной категории надежности.

В зависимости от режима функционирования ОВИ, как было отмечено ранее, электроснабжение потребителей осуществляется либо от системы внешнего электроснабжения (го-

сударственной или региональной электроэнергетической системы), либо от резервного (автономного) источника электрической энергии. Поэтому требуется разработка математических моделей для расчетов установившихся режимов СЭС ОВИ и оценивания их параметров для обоих вариантов электроснабжения потребителей.

Используя известное математическое описание элементов СЭС [8–11], можно получить математическую модель СЭС ОВИ для режима повседневного функционирования потребителей, при котором источник электрической энергии (государственная или региональная электроэнергетическая система) можно считать источником неограниченной мощности, напряжение и частота которого не зависят от изменения условий в сети и остаются постоянными.

Математическая модель представлена в виде схемы замещения, однолинейный фрагмент которой (с учетом передачи электрической энергии по одному вводу) показан на рис. 2. На этом же рисунке представлены устройства компенсации реактивной мощности в местах их возможной установки [12].

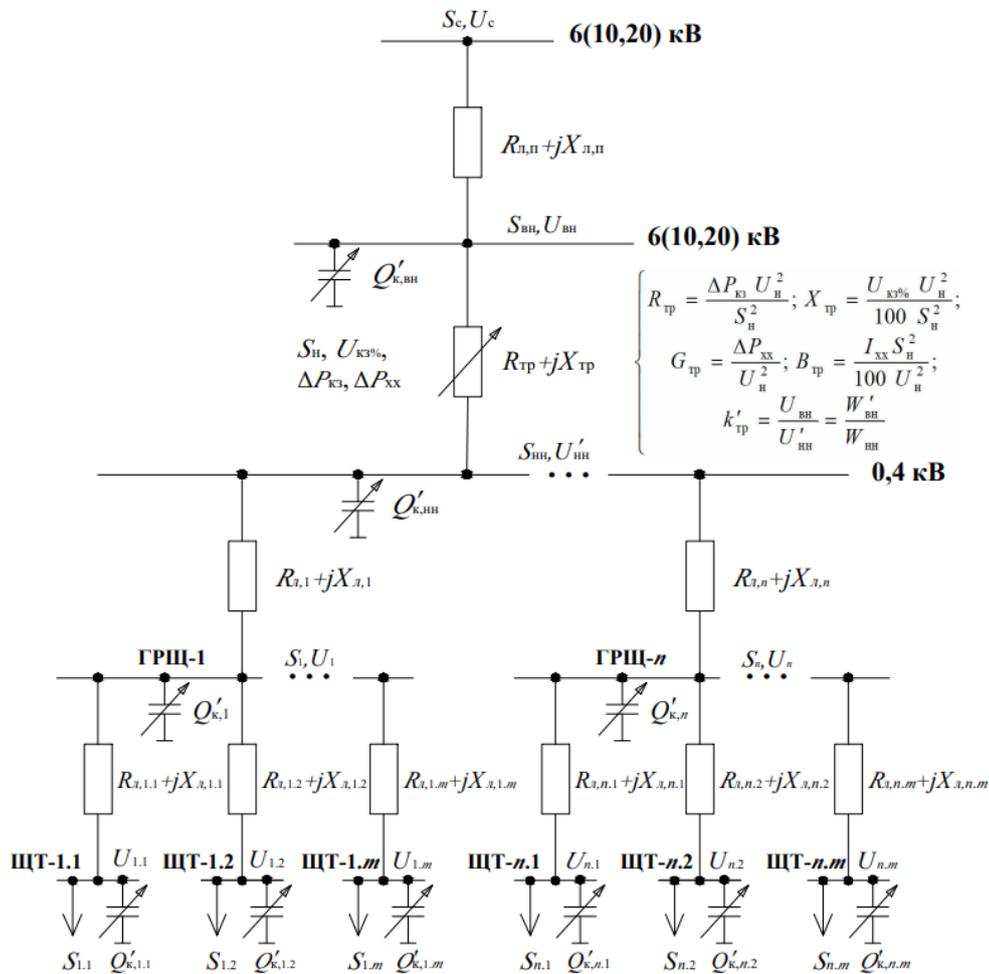


Рис. 2. Фрагмент схемы замещения СЭС ОВИ для режима повседневного функционирования потребителей

Исходными данными для расчета установившегося режима являются:

- параметры схем замещения отдельных элементов СЭС ОВИ, такие как сопротивления, проводимости, коэффициенты трансформации;
- мощности источников питания;

- мощности электрических нагрузок;
- значение напряжения в одном из узлов сети.

Система алгебраических уравнений, описывающая установившийся режим в СЭС ОВИ, имеет следующий вид:

$$\begin{cases}
 S_{\text{вн}} = S_c - \left(\frac{P_{\text{н,вн}}^2 + (Q_{\text{н,вн}} - Q'_{\text{к,вн}})^2}{U_{\text{вн}}^2} \cdot R_{\text{л,п}} + j \frac{(Q_{\text{н,вн}} - Q'_{\text{к,вн}})^2}{U_{\text{вн}}^2} \cdot X_{\text{л,п}} \right), U_{\text{вн}} = U_c - \frac{P_{\text{н,вн}} \cdot R_{\text{л,п}} + (Q_{\text{н,вн}} - Q'_{\text{к,вн}}) \cdot X_{\text{л,п}}}{U_c}; \\
 S_{\text{нн}} = S_{\text{вн}} - \left(\Delta P_{\text{xx}} 8760 + \Delta P_{\text{кз}} \left(\frac{\sqrt{P_{\text{н,тг}}^2 + (Q_{\text{н,тг}} - Q'_{\text{к,нн}})^2}}{S_{\text{ном,тг}}} \right)^2 \tau \right), U'_{\text{нн}} = \frac{U_{\text{вн}}}{k'_{\text{тр}}} = \frac{U_{\text{вн}} \cdot W_{\text{нн}}}{W'_{\text{нн}}}; \\
 S_1 = S'_{\text{нн}} - \left(\frac{P_{\text{н,1}}^2 + (Q_{\text{н,1}} - Q'_{\text{к,1}})^2}{U_{\text{нн}}^2} \cdot R_{\text{л,1}} + j \frac{P_{\text{н,1}}^2 + (Q_{\text{н,1}} - Q'_{\text{к,1}})^2}{U_{\text{нн}}^2} \cdot X_{\text{л,1}} \right), U_1 = U'_{\text{нн}} - \frac{P_{\text{н,1}} \cdot R_{\text{л,1}} + (Q_{\text{н,1}} - Q'_{\text{к,1}}) \cdot X_{\text{л,1}}}{U'_{\text{нн}}}; \\
 S_2 = S'_{\text{нн}} - \left(\frac{P_{\text{н,2}}^2 + (Q_{\text{н,2}} - Q'_{\text{к,2}})^2}{U_{\text{нн}}^2} \cdot R_{\text{л,2}} + j \frac{P_{\text{н,2}}^2 + (Q_{\text{н,2}} - Q'_{\text{к,2}})^2}{U_{\text{нн}}^2} \cdot X_{\text{л,2}} \right), U_2 = U'_{\text{нн}} - \frac{P_{\text{н,2}} \cdot R_{\text{л,2}} + (Q_{\text{н,2}} - Q'_{\text{к,2}}) \cdot X_{\text{л,2}}}{U'_{\text{нн}}}; \\
 \dots \\
 S_n = S'_{\text{нн}} - \left(\frac{P_{\text{н,n}}^2 + (Q_{\text{н,n}} - Q'_{\text{к,n}})^2}{U_{\text{нн}}^2} \cdot R_{\text{л,n}} + j \frac{P_{\text{н,n}}^2 + (Q_{\text{н,n}} - Q'_{\text{к,n}})^2}{U_{\text{нн}}^2} \cdot X_{\text{л,n}} \right), U_n = U'_{\text{нн}} - \frac{P_{\text{н,n}} \cdot R_{\text{л,n}} + (Q_{\text{н,n}} - Q'_{\text{к,n}}) \cdot X_{\text{л,n}}}{U'_{\text{нн}}}; \\
 S_{1,1} = S'_1 - \left(\frac{P_{\text{н,1,1}}^2 + (Q_{\text{н,1,1}} - Q'_{\text{к,1,1}})^2}{U_1^2} \cdot R_{\text{л,1,1}} + j \frac{P_{\text{н,1,1}}^2 + (Q_{\text{н,1,1}} - Q'_{\text{к,1,1}})^2}{U_1^2} \cdot X_{\text{л,1,1}} \right), U_{1,1} = U_1 - \frac{P_{\text{н,1,1}} \cdot R_{\text{л,1,1}} + (Q_{\text{н,1,1}} - Q'_{\text{к,1,1}}) \cdot X_{\text{л,1,1}}}{U_1}; \\
 S_{1,2} = S'_1 - \left(\frac{P_{\text{н,1,2}}^2 + (Q_{\text{н,1,2}} - Q'_{\text{к,1,2}})^2}{U_1^2} \cdot R_{\text{л,1,2}} + j \frac{P_{\text{н,1,2}}^2 + (Q_{\text{н,1,2}} - Q'_{\text{к,1,2}})^2}{U_1^2} \cdot X_{\text{л,1,2}} \right), U_{1,2} = U_1 - \frac{P_{\text{н,1,2}} \cdot R_{\text{л,1,2}} + (Q_{\text{н,1,2}} - Q'_{\text{к,1,2}}) \cdot X_{\text{л,1,2}}}{U_1}; \\
 \dots \\
 S_{1,m} = S'_1 - \left(\frac{P_{\text{н,1,m}}^2 + (Q_{\text{н,1,m}} - Q'_{\text{к,1,m}})^2}{U_1^2} \cdot R_{\text{л,1,m}} + j \frac{P_{\text{н,1,m}}^2 + (Q_{\text{н,1,m}} - Q'_{\text{к,1,m}})^2}{U_1^2} \cdot X_{\text{л,1,m}} \right), U_{1,m} = U_1 - \frac{P_{\text{н,1,m}} \cdot R_{\text{л,1,m}} + (Q_{\text{н,1,m}} - Q'_{\text{к,1,m}}) \cdot X_{\text{л,1,m}}}{U_1}; \\
 \dots \\
 S_{n,m} = S'_n - \left(\frac{P_{\text{н,n,m}}^2 + (Q_{\text{н,n,m}} - Q'_{\text{к,n,m}})^2}{U_n^2} \cdot R_{\text{л,n,m}} + j \frac{P_{\text{н,n,m}}^2 + (Q_{\text{н,n,m}} - Q'_{\text{к,n,m}})^2}{U_n^2} \cdot X_{\text{л,n,m}} \right), U_{n,m} = U_n - \frac{P_{\text{н,n,m}} \cdot R_{\text{л,n,m}} + (Q_{\text{н,n,m}} - Q'_{\text{к,n,m}}) \cdot X_{\text{л,n,m}}}{U_n}.
 \end{cases}$$

Применение разработанной математической модели СЭС объектов военной инфраструктуры позволит:

- произвести проверку допустимости параметров режима для элементов СЭС объектов военной инфраструктуры;
- оценить качество электрической энергии путем сравнения отклонений напряжения в узлах СЭС с допустимыми отклонениями напряжений от номинальных значений;
- определить технико-экономические показатели режима по величинам потерь мощности и электрической энергии в элементах и СЭС объектов военной инфраструктуры в целом.

Кроме того, данная математическая модель позволяет провести анализ влияния средств регулирования (трансформаторов, регулируемых под нагрузкой; регулируемых устройств компенсации реактивной мощности, установленных в узлах СЭС) на параметры установившегося режима и на его основе вырабатывать управляющие воздействия.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ РЕЖИМА БОЕВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В режиме боевого функционирования ОВИ электроснабжение потребителей осуществляется от резервного (автономного) источника, который является источником с ограниченной мощностью, сопоставимой с номинальной потребляемой мощностью подключенного оборудования. В СЭС ОВИ в качестве такого источника, как правило, используется дизельная

электростанция или совокупность дизельных электростанций, включенных параллельно и работающих на общую нагрузку. Фрагмент схемы замещения СЭС ОВИ для данного случая имеет вид, представленный на рис. 3.

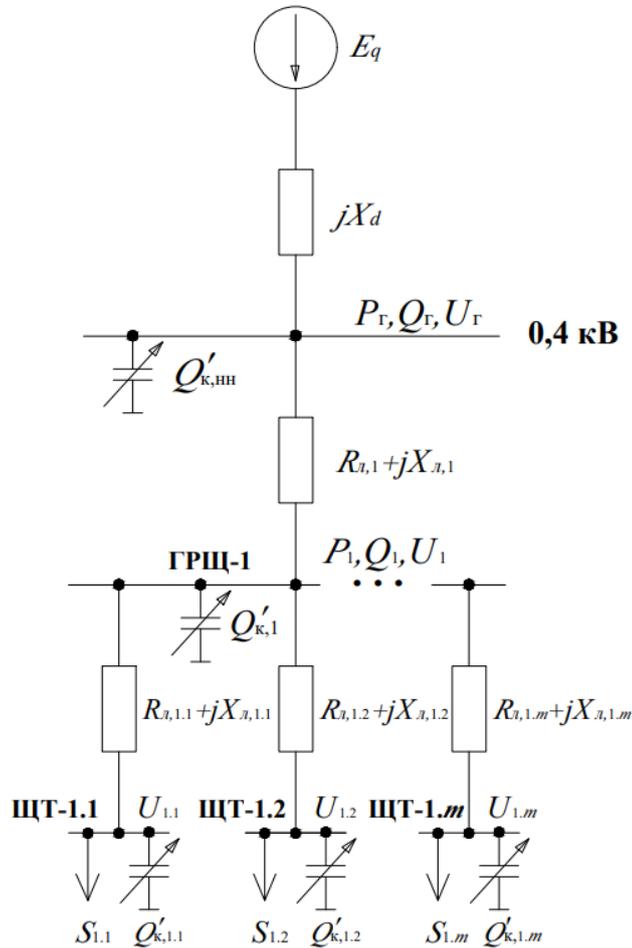


Рис. 3. Фрагмент схема замещения СЭС ОВИ для режима боевого функционирования потребителей

В этом случае система алгебраических уравнений, описывающая установившийся режим в СЭС ОВИ, при известных параметрах мощности и напряжения у потребителя имеет вид

$$\begin{cases} P_1 = \sum_{j=1}^m P_{н,1,j} + \sum_{j=1}^m \frac{P_{н,1,j}^2 + (Q_{н,1,j} - Q'_{к,1,j})^2}{U_{1,j}^2} \cdot R_{л,1,j}; \\ Q_1 = \sum_{j=1}^m Q_{н,1,j} + \sum_{i=1}^m \frac{P_{н,1,j}^2 + (Q_{н,1,j} - Q'_{к,1,j})^2}{U_{1,j}^2} \cdot X_{л,1,j}; \\ U_1 = U_n + \max_{j=1,m} \frac{P_{н,1,j} \cdot R_{л,1,j} + (Q_{н,1,j} - Q'_{к,1,j}) \cdot X_{л,1,j}}{U_n}; \\ P_r = P_1 + \frac{P_1^2 + (Q_1 - Q'_{к,1})^2}{U_1^2} \cdot R_{л,1}; \\ Q_r = Q_1 + \frac{P_1^2 + (Q_1 - Q'_{к,1})^2}{U_1^2} \cdot X_{л,1}; \\ U_r = U_1 + \frac{P_1 \cdot R_{л,1} + (Q_1 - Q'_{к,1}) \cdot X_{л,1}}{U_1}. \end{cases}$$

Данная модель позволяет определить необходимые номинальные параметры генераторного агрегата дизельной электростанции, смоделировать различные режимы работы автономного источника, получить количественную оценку мощности и напряжения в различных узлах системы в зависимости от ее конфигурации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны модели СЭС, позволяющие оценить ее параметры в различных режимах и условиях функционирования ОВИ. Особенностью представленных моделей является то, что они позволяют произвести расчет параметров установившегося режима работы СЭС с учетом наличия в ней средств регулирования напряжения в электрических сетях, а именно устройств регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой и устройств компенсации реактивной мощности, установленных в различных узлах системы.

Кроме того, разработанные модели учитывают особенности электроснабжения потребителей ОВИ как от системы внешнего электроснабжения (системы энергоснабжающей организации), так и от резервного (автономного) источника электрической энергии. Использование данных моделей позволит:

- производить проверку допустимости параметров режима для элементов электрической сети;
- оценить качество электрической энергии в различных узлах системы;
- определить эксплуатационно-технические показатели СЭС ОВИ как при ее проектировании, так и в процессе эксплуатации;
- провести анализ работоспособности СЭС и выработку управляющих воздействий в различных режимах работы электрической сети.

Разработанные модели могут являться основой для создания имитационных моделей в различных прикладных программах, например в MatLab, что существенно повысит эффективность решения рассматриваемых задач.

Список используемых источников

1. Карагодин В. В., Ревяков Б. А., Рыбаков Д. В. Исследование аварийных режимов работы систем электроснабжения объектов военной инфраструктуры с помощью математического пакета MatLab // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2022. – Вып. 681. – С. 89–96.
2. Карагодин В. В., Прищеп Д. Н., Рыбаков Д. В. Комплексный подход к определению надежности и живучести систем электроснабжения специальных объектов // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 687. – С. 199–204.
3. Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В., Рыбаков Д. В. Системы электроснабжения специальных объектов : учеб. пособие. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2019. – 173 с.
4. Авсюкевич Д. А., Мандрица Д. П. Концепция обеспечения эксплуатационной пригодности специальных сооружений в условиях аварийных нагрузок и воздействий // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – Вып. 2. – С. 140–148.
5. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. – М. : ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – 90 с.
6. Карагодин В. В., Ильин А. В., Рыбаков Д. В. Математические модели распределительной электрической сети для исследования режимов ее функционирования // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2023. – Вып. 688. – С. 130–139.
7. Идельчик В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

8. Герасимов А. Н., Ефимов В. В., Пешихонов Н. Е. Установившиеся режимы электроэнергетических систем специальных комплексов : учеб. пособие. – СПб. : ВИККИ им. А. Ф. Можайского, 1991. –167 с.

9. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии : учеб. пособие. – 4-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2020. –648 с.

10. Моделирование режимов работы электроэнергетических систем : учеб. пособие / И. А. Муратаев [и др.]. – Казань : Казанск. гос. энерг. ун-т, 2019. – 94 с.

11. Идельчик В. И. Электрические системы и сети : учебник для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

12. Карагодин В. В., Рыбаков Д. В. Оптимизация размещения устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях // Вопросы электромеханики. – 2014. – Т. 144. – С. 43–50.

Д. Л. Каргу,
кандидат технических наук, доцент;
Г. Б. Стеганов,
кандидат технических наук, доцент;
А. В. Янгузов

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В статье рассмотрена возможность повышения срока активного существования космического аппарата за счет увеличения срока службы бортового накопителя электрической энергии. Представлены цифровые модели комбинированного накопителя и результаты моделирования его различных режимов работы в виде временных диаграмм изменения значений тока и напряжения на нагрузке. Представлены характеристики макета комбинированного накопителя электрической энергии. Предложен вариант практической реализации комбинированного накопителя электрической энергии в составе системы электроснабжения космического аппарата.

Ключевые слова: космический аппарат, бортовая система электроснабжения, аккумуляторная батарея, блок ионисторов, комбинированный накопитель электрической энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Бортовая система электроснабжения (СЭС) является одной из критичных систем малых космических аппаратов (МКА), так как ее отказ приводит к отказу всего аппарата. В настоящее время в системе электроснабжения МКА в качестве основного источника восполнения электрической энергии используются солнечные батареи (СБ). Основным устройством накопления электрической энергии (ЭЭ) служит аккумуляторная батарея (АБ). Ввиду жестких ограничений на массогабаритные характеристики СЭС, количества электроэнергии на борту МКА чаще всего не хватает либо для восстановления энергетического баланса (ввиду малой поверхности СБ), либо для случая выполнения сеанса управления (связи) на теневом участке орбиты.

Восполнение дефицита электрической энергии возможно путем организации импульсного дистанционного канала подзарядки. Но это приводит к появлению дополнительных циклов «заряд-разряд» бортового накопительного устройства и к ускоренной выработке им своего ресурса. Поэтому цель публикации статьи заключается в рассмотрении возможности продления срока активного существования космического аппарата за счет увеличения срока службы бортового накопителя ЭЭ.

Срок службы АБ космического аппарата определяется интервалом времени, в течение которого он, заряжаясь и разряжаясь, способен отдавать во внешнюю цепь количество электроэнергии (или емкость), которое составляет не менее гарантированного значения – 70% номинальной емкости Q_n (реже 80% номинальной емкости), при напряжении не ниже заданного минимального уровня. Срок службы аккумулятора характеризуется также и наработкой в циклах «заряд-разряд» – числом циклов, обрабатываемых до указанного предельного состояния (техническим ресурсом аккумулятора).

Если осуществлять «заряд-разряд» аккумуляторной батареи на основе штатных химических источников тока (ХИТ) в импульсном режиме, то может произойти ее отказ по превышению числа допустимых циклов «заряд-разряд». Поэтому в системе электроснабжения малого космического аппарата требуется применение многофункционального накопительного устройства – комбинированного накопителя электрической энергии (КНЭЭ). В состав КНЭЭ входят нескольких принципиально отличающихся друг от друга аккумулирующих электри-

ческую энергию накопителей: аккумуляторной батареи, блока ионисторов (БИ) и блока электролитических конденсаторов (БК).

Параметры основных типов накопителей ЭЭ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры накопителей ЭЭ

Параметры	Тип накопителя			
	Аккумуляторы		Ионисторы	Электролитические конденсаторы
	щелочные	литий-ионные		
Удельная энергия, Вт·ч/кг	15–80	80–220	2–10	0,5–2,5
Удельная мощность, Вт/кг	500–1300	800–3000	1200–1500	1200–1500
Число циклов	300–2000	300–500	1000000	1000000
Диапазон температур, С ⁰	От -50 до +85	От -25 до +70	От -25 до +70	От -40 до +105

Совместное применение рассмотренных накопителей осуществляется при помощи комплекса автоматики, в состав которого входят (рис. 1):

- комплект зарядных и разрядных устройств;
- блок управления и коммутации.

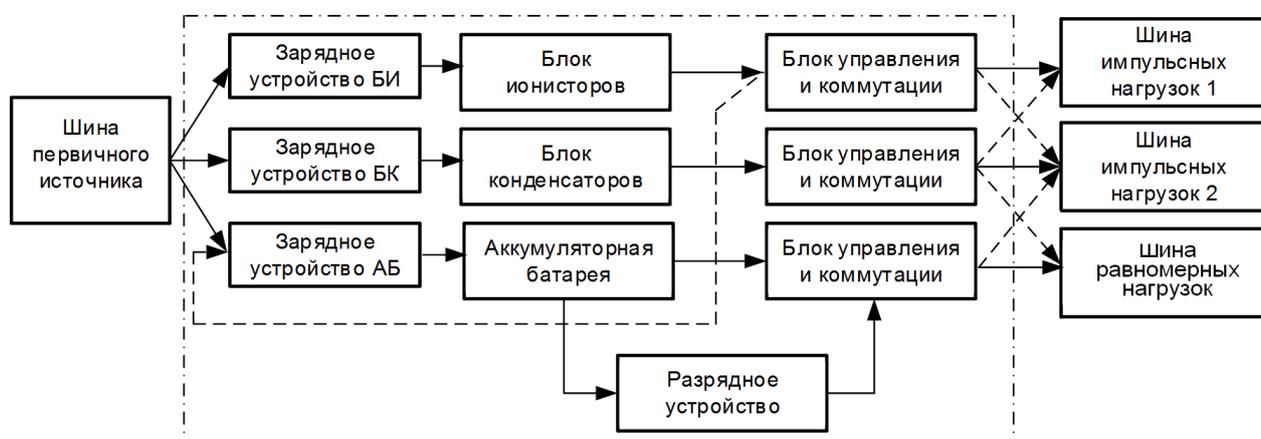


Рис. 1. Структурная схема комбинированного накопителя ЭЭ

На сегодняшний день уже известно применение КНЭЭ [1, 9]. Однако они обладают недостатками в импульсном режиме заряда и при обеспечении электропитания импульсной нагрузки [1, 9].

ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОМБИНИРОВАННОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Оценка энергетических характеристик комбинированного накопителя ЭЭ осуществляется на основе определения расчетной энергии, которая представляет собой такое количество энергии, которое он гарантированно выдаст на постоянную внешнюю нагрузку R_H в интер-

вале допустимых напряжений, определяемом согласно особенностям работы бортовой аппаратуры МКА.

Выражение для нахождения средней расчетной энергии АБ для обеспечения питания постоянной нагрузки МКА в интервале допустимых напряжений

$$\Delta U_{AB} = U_{\max AB} - U_{\min AB} \quad (1)$$

будет иметь вид

$$W_{\text{ср. эф. АБ}} = \tau(U_{\max AB}^2 - U_{\min AB}^2)/2R_{\text{пост. н.}} \quad (2)$$

где $U_{\min AB}$ – минимально допустимое напряжение АБ;

$U_{\max AB}$ – максимально допустимое напряжение АБ.

В качестве характеристики, по которой можно оценить энергетические свойства ионистора, можно использовать его емкость [8]. При централизованном расположении блока ионисторов (непосредственно в гибридном НЭЭ) его энергия на время импульса будет обеспечивать весь спектр нагрузок МКА – импульсных и постоянных, имеющих сопротивления $R_{\text{имп. н}}$ и $R_{\text{пост. н}}$ соответственно.

Пусть интервал допустимых напряжений разряда блока ионисторов

$$\Delta U_{\text{БСК}} = U_{\max \text{БСК}} - U_{\min \text{БСК}}. \quad (3)$$

Если не использовать дополнительные устройства стабилизации выходного напряжения блока ионисторов, то необходимо увеличивать интервал допустимых напряжений по верхнему пределу, поэтому его целесообразно проектировать с $U_{\max \text{БСК}} > U_{\max AB}$ и чем больше будет левая часть данного неравенства, тем больше времени будет обеспечиваться нагрузка перспективного МКА энергией от блока ионисторов [8].

Пусть в части обеспечения питания импульсной нагрузки МКА необходимо обеспечить n последовательных импульсов, длительностью τ с промежутком между импульсами T . При условии, что T стремится к нулю ($T \rightarrow 0$), среднюю расчетную энергию блока ионисторов можно представить выражением

$$W_{\text{ср. эф. БСК}} = \tau n(U_{\max \text{БСК}}^2 - U_{\min \text{БСК}}^2)/2(R_{\text{имп. н}} + R_{\text{пост. н}}). \quad (4)$$

Предельное условие $T \rightarrow 0$ позволяет максимально жестко задать требования к блоку ионисторов. Это упрощает задачу, так как позволяет не рассматривать наблюдаемые на практике релаксирующие процессы в блоке ионисторов между импульсами, объединить n импульсов в один импульс с длительностью τn [8].

Особенность применения предлагаемого КНЭЭ заключается в том, что после получения исходных данных о текущем состоянии составных частей бортовой СЭС (запаса электрической энергии в АБ, величины энергопритока от СБ, типа сеансной нагрузки – импульсная или непрерывная и т. д.) определяются оптимальный режим «заряда-разряда» и комбинация задействованных накопителей. Тем самым формируются (коммутируются) наилучшие каналы передачи энергии «источник – накопитель» и «накопитель – нагрузка» [1, 6, 7].

Структурная схема предлагаемого комбинированного накопителя ЭЭ представлена на рис. 1.

В зависимости от условий орбитального движения МКА основными режимами работы накопителя в составе СЭС являются:

1) прием электроэнергии первичного источника в штатном непрерывном режиме, заряд (восполнение энергии) накопителей и питание равномерных нагрузок по циклограмме;

2) прием электроэнергии первичного источника в прерывистом (импульсно-периодическом) режиме с ее накоплением в блоках ионисторов и конденсаторов, питание дежурных нагрузок;

3) передача энергии заряженных ионисторов в АБ, питание дежурных нагрузок, возврат к режиму 1;

4) передача энергии АБ в штатном режиме блокам ионисторов и конденсаторов, питание нагрузок по заданной программой полета циклограмме;

5) содержание полностью заряженных накопителей в готовности к энергоемкому импульсному потреблению;

6) выбор наилучшего накопителя (по совокупности критериев или их комбинации) для каждой шины, питание импульсных мощных потребителей по их циклограмме работы.

При моделировании и исследовании энергетических процессов автономных СЭС необходимо иметь энергетические модели отдельных элементов комбинированного накопителя с целью определения параметров всей системы. Для разработки модели СЭС была использована среда *Electronics Workbench* [11]. На рис. 2 представлена функциональная схема модели литий-ионной аккумуляторной батареи. В ней пользователь может изменять такие параметры, как максимальная емкость АБ, номинальное рабочее напряжение и температура окружающей среды.

На рис. 3 представлена функциональная схема модели ионистора. В ней пользователь может изменять такие параметры, как емкость ионистора, сопротивление и емкость его выводов.

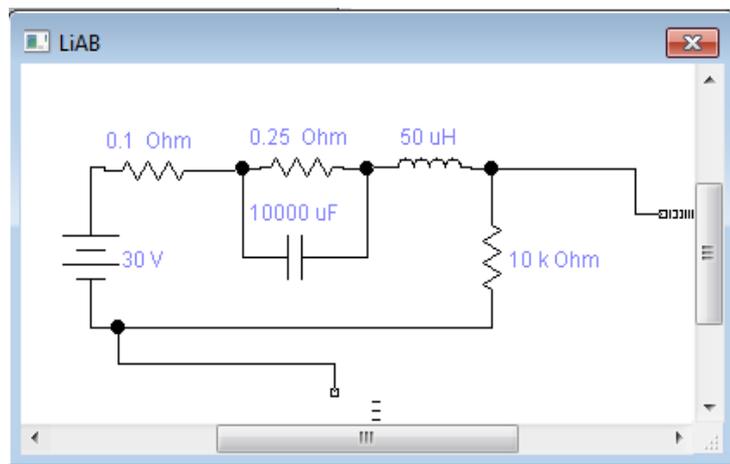


Рис. 2. Функциональная схема модели литий-ионной АБ в среде *Electronics Workbench*

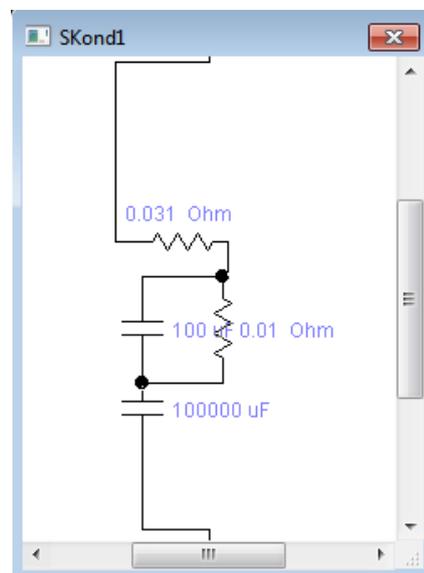


Рис. 3. Функциональная схема модели ионистора в среде *Electronics Workbench*

На рис. 4 представлена функциональная схема модели комбинированного накопителя. Модель позволяет пользователю изменять такие параметры, как подключение или отключение нагрузки, подключение и отключение различных составных частей КН и номинальное рабочее напряжение.

При рассмотрении импульсных режимов «заряда-разряда» накопителя возможны варианты питания импульсных нагрузок с последующим восполнением.

1. Импульсный полный разряд с полным восполнением энергоемкости.
2. Импульсный частичный разряд с полным восполнением энергоемкости между импульсами.
3. Многоимпульсный полный разряд без восполнения между импульсами.
4. Многоимпульсный полный разряд с циклическим восполнением (после серии).
5. Многоимпульсный частичный (неполный) разряд с ограничением напряжения на нагрузке и полным восполнением (после серии).

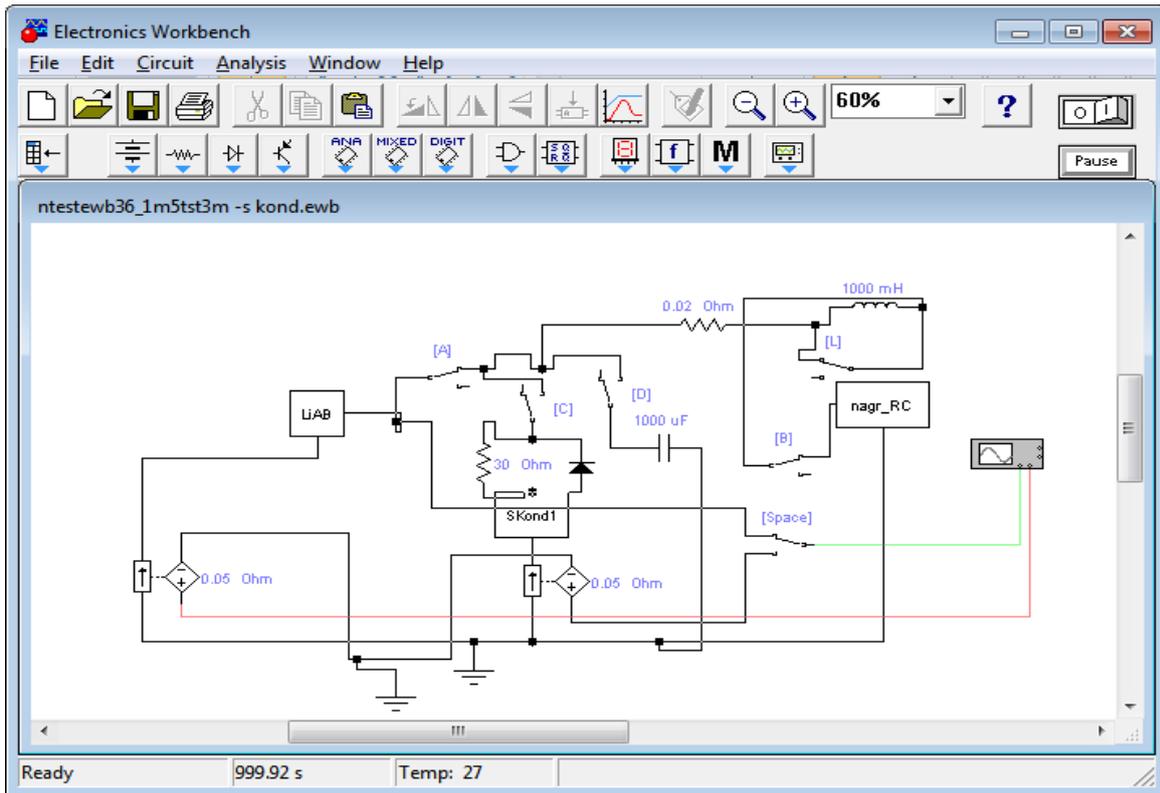


Рис. 4. Функциональная схема модели комбинированного накопителя в среде Electronics Workbench

Результаты функционирования цифровой модели комбинированного накопителя в различных режимах работы в виде временных диаграмм изменения значений тока и напряжения на нагрузке представлены на рис. 5–8.

Предложенная структурная схема комбинированного накопителя ЭЭ (см. рис. 1) при работе в штатном режиме обеспечивает:

- заряд аккумуляторной батареи от фотоэлектрических преобразователей (солнечной батареи) при приеме непрерывного светового потока;
- питание постоянной нагрузки от блока аккумуляторных батарей;
- заряд блока ионисторов от фотоэлектрического преобразователя (солнечной батареи) при приеме импульсного светового потока;
- питание импульсной нагрузки от блока ионисторов.

В нештатном режиме (аварийный режим, при котором один из накопителей вышел из строя) предложенная схема позволяет питать:

- постоянную нагрузку от блока ионисторов;
- импульсную нагрузку от аккумуляторных батарей.

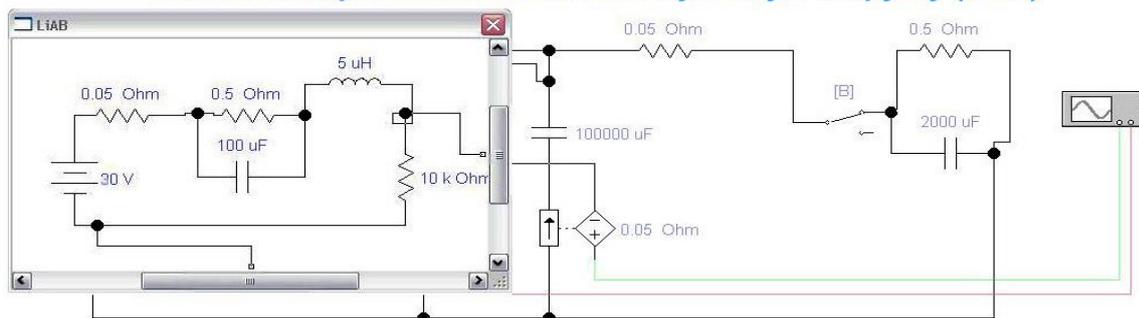
Непрерывный режим заряда от СБ предполагается на освещенном участке орбиты космического аппарата, а импульсный режим – на теневом участке орбиты.

В рамках работы был изготовлен макет комбинированного накопителя, его особенности представлены на рис. 9.

Предлагаемый комбинированный накопитель электрической энергии обладает большой емкостью и малым внутренним сопротивлением. Кроме этого, он способен накапливать и отдавать энергию с высокой скоростью, сохранять свои характеристики при частых перезарядках.

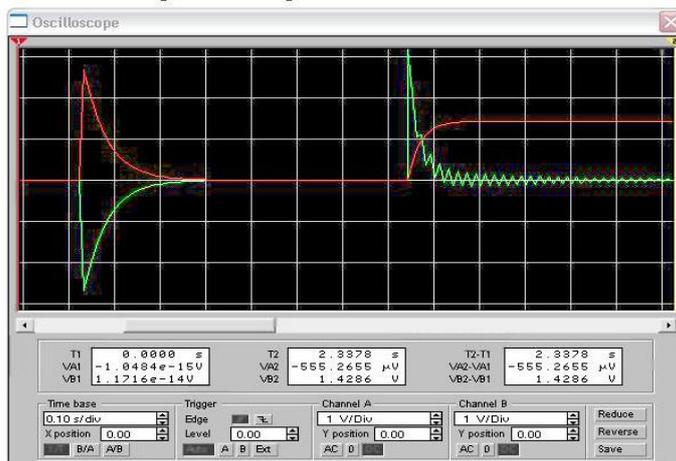
Сравнительные технические характеристики макета представлены в табл. 2.

Совместная работа АБ и БК на импульсную нагрузку (токи)

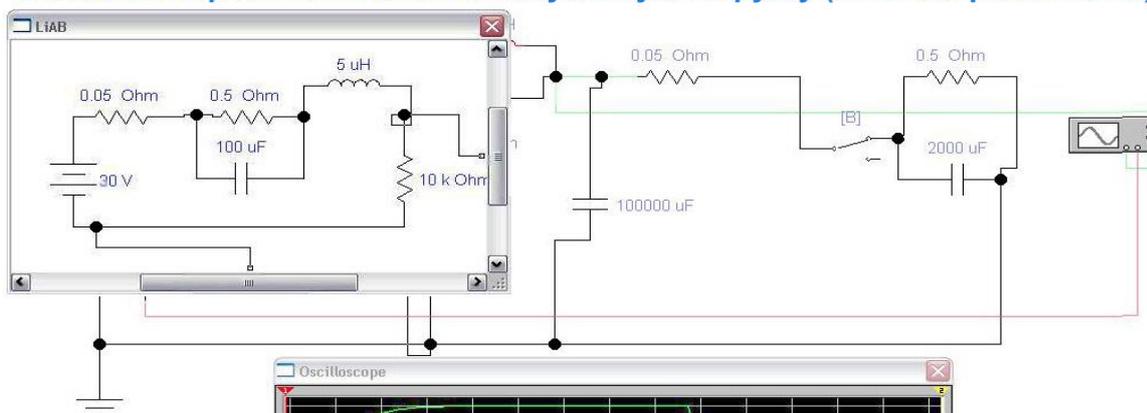


Совместная работа АБ и БК на импульсную нагрузку.
 Красный - ток АБ,
 Зеленый - ток БК.
 Слева заряд БК, затем хранение и совместный с АБ разряд на импульсную нагрузку.

Важно, что передний фронт импульса нагрузки формирует только БК, АБ плавно нагружается



Совместная работа АБ и БК на импульсную нагрузку (ток и напряжение БК)



Красный - ток АБ,
 Зеленый - напряжение блока конденсаторов БК

Заряд БК, хранение, разряд АБ и БК на импульсную нагрузку

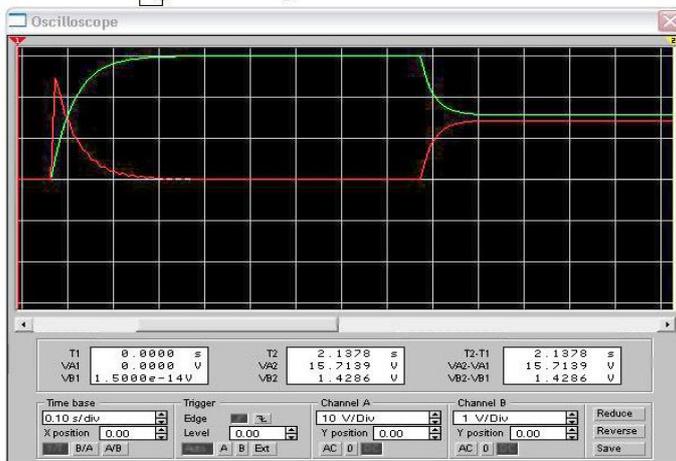
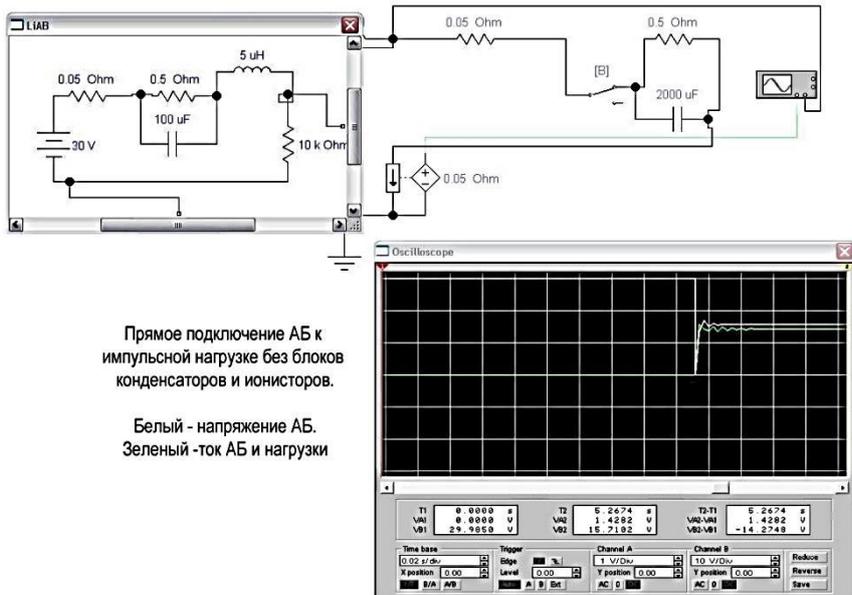
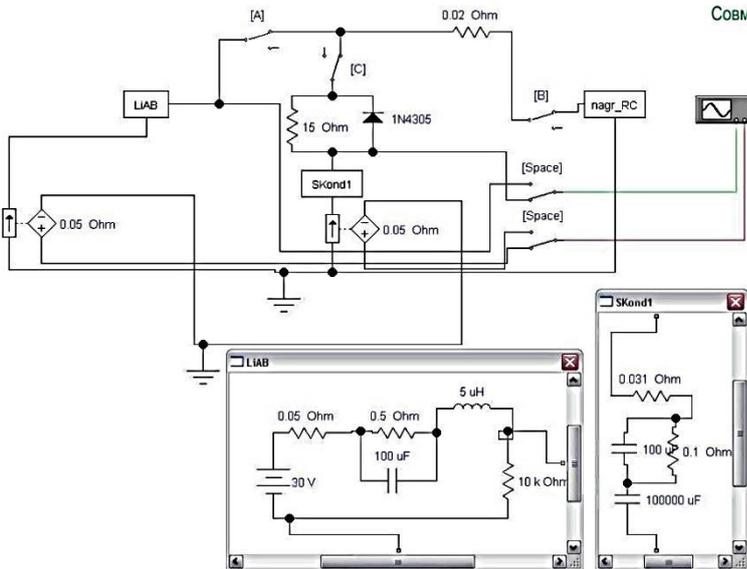


Рис. 5. Результаты моделирования импульсного полного разряда с полным восполнением емкости



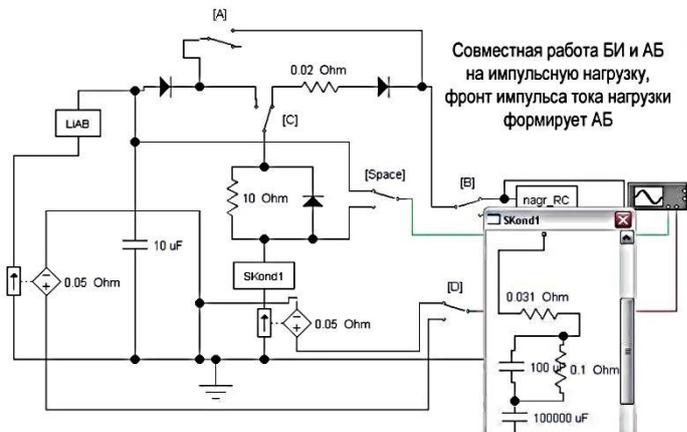
Прямое подключение АБ к импульсной нагрузке без блоков конденсаторов и ионисторов.

Белый - напряжение АБ.
Зеленый - ток АБ и нагрузки



Совместная работа блока ионисторов БИ и АБ

Слева заряд ионистора, затем хранение и разряд на импульсную нагрузку.
Красный - ток АБ, зеленый - напряжение БИ.
БИ не разгружает АБ от переднего фронта импульсного тока нагрузки



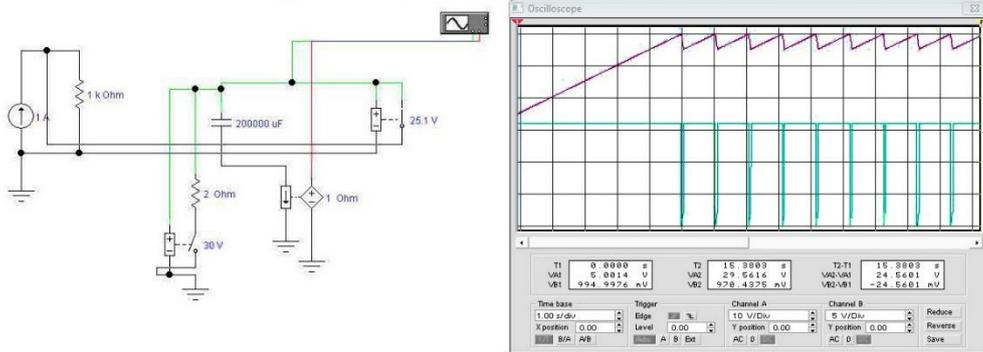
Совместная работа БИ и АБ на импульсную нагрузку, фронт импульса тока нагрузки формирует АБ

Зеленый - напряжение ЛИ АБ, красный - ее ток

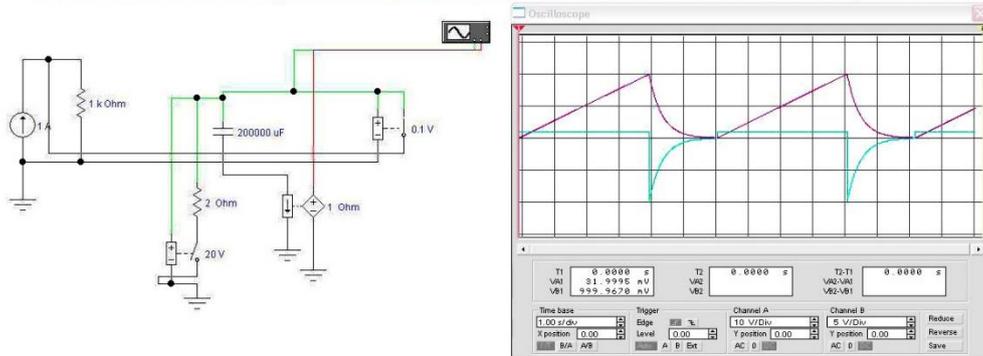
Рис. 6. Результаты моделирования импульсного частичного разряда с полным восполнением энергоемкости между импульсами

Блок конденсаторов комбинированного накопителя

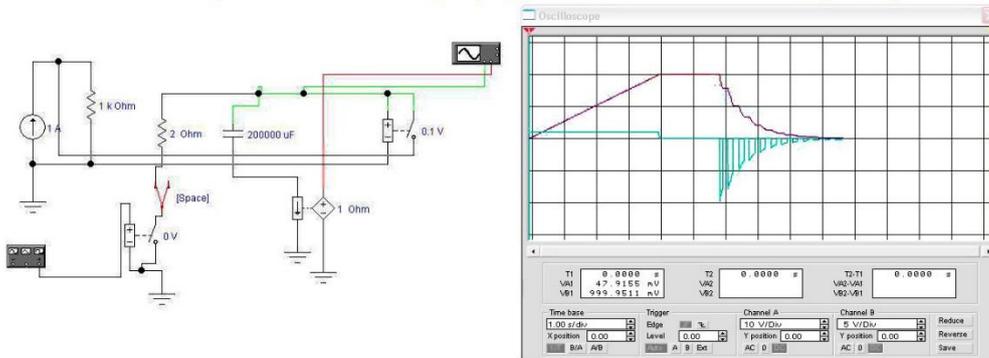
Режим частичного импульсного разряда с полным восполнением емкости



Режим полного импульсного разряда с полным восполнением емкости



Режим многоимпульсного полного разряда без восполнения между импульсами



Режим многоимпульсного разряда с циклическим восполнением

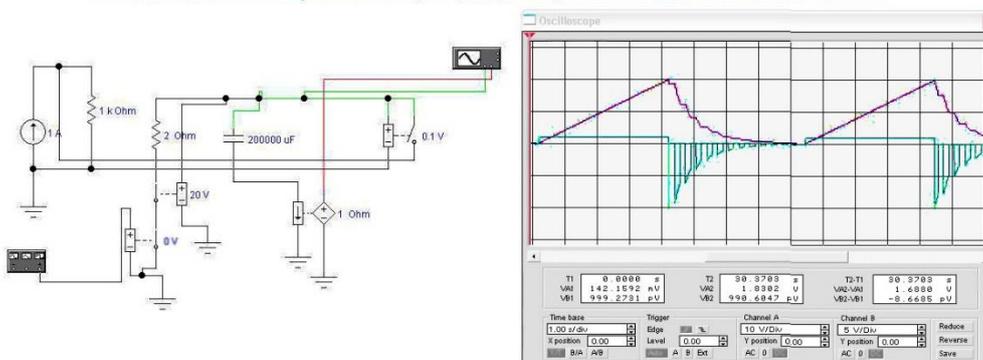
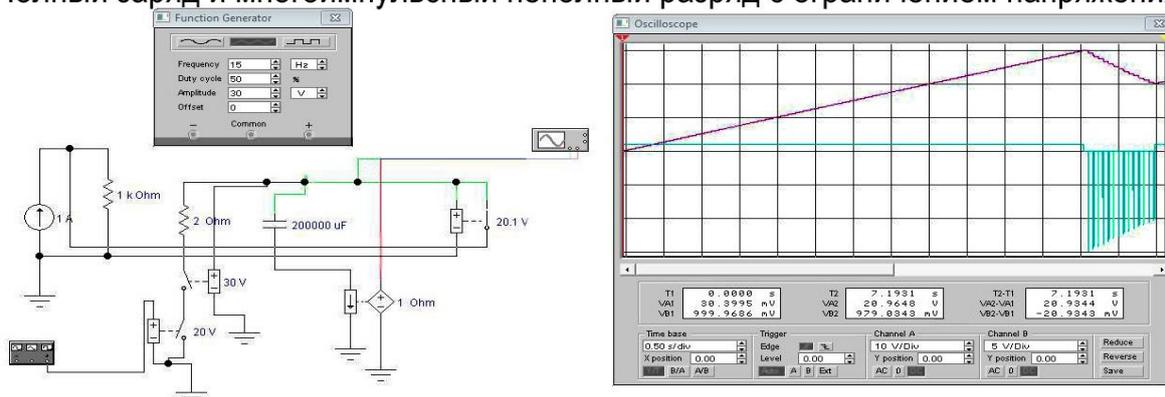
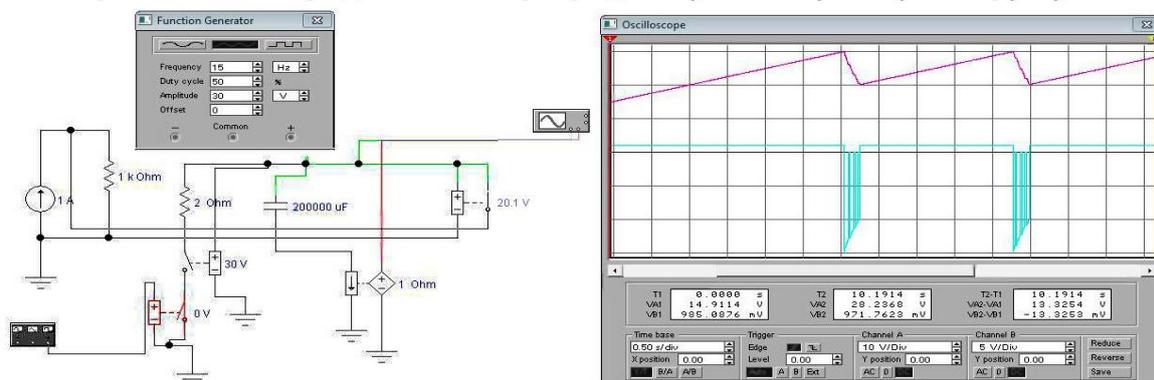


Рис. 7. Результаты моделирования многоимпульсного полного разряда с циклическим восполнением (после серии)

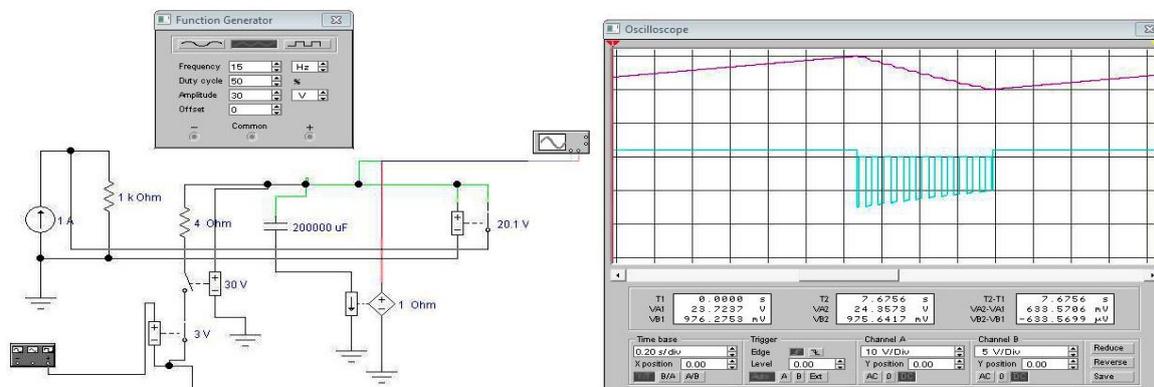
Полный заряд и многоимпульсный неполный разряд с ограничением напряжения



Циклический заряд-неполный разряд на ту же импульсную нагрузку



Циклический заряд-неполный разряд на импульсную нагрузку, сниженную вдвое



Циклический заряд-разряд на импульсную нагрузку, сниженную еще вдвое

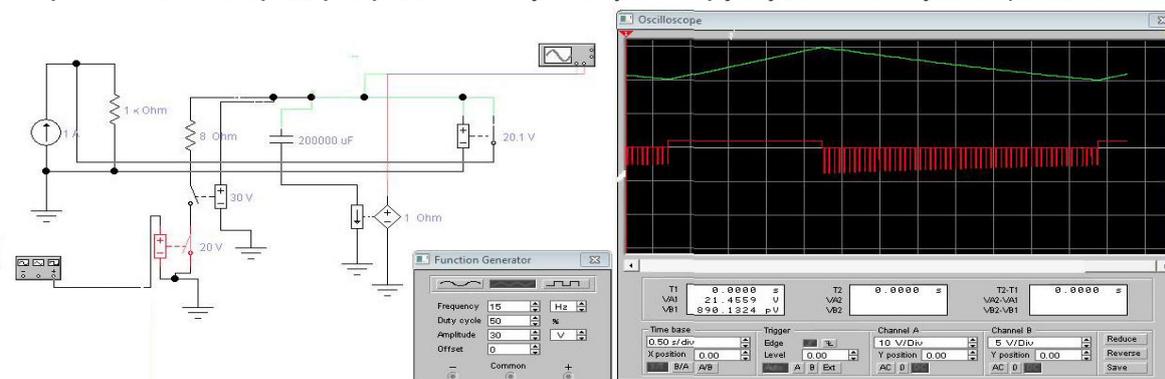


Рис. 8. Результаты моделирования многоимпульсного частичного(неполного) разряда с ограничением напряжения на нагрузке и полным восполнением (после серии)



Рис. 9. Внешний вид макета комбинированного накопителя

Таблица 2

Сравнительные характеристики различных типов накопителей

Тип накопителя (источника)	Основные параметры			
	Удельная энергия, кДж/кг	Удельная мощность, кВт/кг	Срок службы, циклы / время экпл., годы	Время зарядки, мин
АБ	120–180	50–5000	до 3000 / 5	60–120
БИ	4–10	< 10000	10^6 – 10^8 / 10	0,5–20
КНЭЭ	150–180	8000–10000	10^6 – 10^8 / 5÷7	Зависит от циклограммы потребления

Практическая реализация функциональных узлов предлагаемого КНЭЭ может быть выполнена следующим образом. В качестве источника постоянной электроэнергии может служить солнечная батарея, собранная на основе фотоэлектрических преобразователей [3]. Для аккумуляции электрической энергии используется литий-ионные батареи и производимые в настоящий момент промышленностью ионисторы [1, 2]. Управляющее устройство может быть реализовано на основе микропроцессорного устройства управления (МПУУ), датчиков тока и напряжений, электронных коммутаторов (ключей), построенных на базе составных транзисторов. В качестве МПУУ можно использовать изделия фирмы ATMEL (AVR) [4]. Так, микроконтроллер данной фирмы Tiny AVR имеет FLASH-память программ объемом 1–2 Кбайта, оперативную память (статическое ОЗУ) объемом 1–2 Кбайта и память данных EEPROM объемом 64 байта, при геометрических размерах менее 1 см² и весе в несколько грамм. Такого количества памяти достаточно для вводимых исходных данных заданной циклограммы работы. Для программирования указанных микроконтроллеров можно

использовать аппаратные средства (программаторы STK-500, STK-50, ICE50, AS2) и программные средства (AVR Studio, ICC AVR, System Designer).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества использования комбинированного накопителя электрической энергии основаны на применении комплекса автоматики, который позволяет обеспечить согласованное подключение заданного типа накопителей для накопления электрической энергии, поступающей в постоянном или импульсном режиме, с возможностью ее использования для раздельного питания потребителей в зависимости от характера их нагрузки.

Техническим результатом применения предложенного КНЭЭ являются:

– увеличение сроков службы применяемых накопителей, заряжаемых от оптимально согласованных источников электрической энергии;

– повышение эффективности накопления и использования электрической энергии на основе совместного использования аккумуляторных батарей и блока ионисторов в штатных системах электроснабжения космических аппаратов различных типов и других устройств с автономным питанием для накопления электрической энергии, поступающей в постоянном или импульсном режиме, с возможностью ее использования для раздельного питания потребителей в зависимости от характера их нагрузки.

Таким образом, срок службы накопителя электрической энергии бортовой системы электроснабжения увеличен в среднем на 20% по сравнению с существующими техническими решениями (см. табл. 2).

Следовательно, срок активного существования малого космического аппарата также увеличен на 15–18% по сравнению с ранее известными результатами.

Комбинированный накопитель электрической энергии может быть использован (реализован) на всех типах существующих и перспективных космических аппаратов различного назначения с внесением дополнительных изменений в систему электроснабжения, с учетом сохранения заданных массогабаритных характеристик.

Список используемых источников

1. Пат. на изобретение РФ № 2799494. Устройство накопления электроэнергии / Каргу Д. Л., Безняков А. М., Немиров А. В., Кузнецов В. А., Тимофеев В. А. – № 2022114666; заявл. 30.05.2022; опубл. 05.07.2023, Бюл. № 19. – 12 с.

2. *Ray S., Baghzouz Y.* Effectiveness of Battery-Supercapacitor Combination in Electric Vehicles // IEEE Bologna Power Tech Conference. – Italy, Bologna. – 2003. – P. 385–390.

3. *Рыкованов А. Н.* Системы питания Li-ion аккумуляторных батарей // Силовая электроника. – 2009. – № 1. – С. 41–54.

4. *Чилин Ю. Н.* Моделирование и оптимизация в энергетических системах КА. – СПб. : ВИКА, 1995. – 277 с.

5. *Евстифеев А. В.* Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы «ATMEL». – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 412 с.

6. Системы электроснабжения космических аппаратов и ракет-носителей : учеб. пособие / В. А. Власов [и др.]. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. – 116 с.

7. Пат. на изобретение № 2598862. Система электроснабжения космического аппарата / Каргу Д. Л., Безняков А. М., Кузнецов В. А., Комаров П. А., Овсянников А. Е. – № 2015102425/07; заявл. 26.01.2015; опубл. 27.09.2016, Бюл. № 27. – 9 с.

8. Стенд для исследования комбинированного накопителя электрической энергии : рационализаторское предложение / Д. Л. Каргу, А. М. Безняков, В. А. Кузнецов, А. Я. Ольховский.

// Новатор : журн. / под ред. Ю. В. Кулешова. – СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2020. – Вып. 36. – С. 27–32.

9. *Носкин Г. В., Хаванов Е. С., Бесчастный К. А.* Гибридный накопитель электрической энергии на основе литий-ионных аккумуляторов и блоков суперконденсаторов для систем электроснабжения возвращаемых космических аппаратов // Лесной вестник. – 2019. – Т. 23, № 4. – С. 39–48. – DOI: 10.18698/2542-1468-2019-4-39-48.

10. Пат. на изобретение РФ № 2488198. Стабилизированный комбинированный источник электропитания / Галушко А. И., Гром Ю. И., Лазарев А. Н., Салихов Р. С. – № 2012121375/07; заявл. 23.05.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 7 с.

11. *Дорошков А. В.* Теория и практика виртуальных исследований устройств электроники : учеб. пособие. – СПб. : НИУ ИТМО; Ин-т холода и биотехнологий, 2013. – 151 с.

В. А. Клыков,
кандидат технических наук;
В. Н. Ломтев;
А. И. Лоскутов,
доктор технических наук, профессор;
В. Г. Перле;
Д. Б. Семенюк,
кандидат технических наук

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА

Представлено формирование нечетких правил логического вывода для поддержки принятия решений по выбору модели при испытаниях и эксплуатации изделий ракетно-космической техники. Предлагается использование нечеткой логики и нейронных сетей для формирования правил логического вывода при принятии решений по выбору моделей. Сформированы матрицы экспертных знаний при формализации нечеткого вывода для бортовой аппаратуры, которые позволяют сформировать множество (всё разнообразие) обучающих векторов нейронной сети.

Ключевые слова: изделия ракетно-космической техники, нечеткие правила логического вывода, нейронные сети.

ВВЕДЕНИЕ

В общем случае задачи испытаний изделий ракетно-космической техники (РКТ) при подготовке к запуску и в процессе эксплуатации, а также выполнения целевых функций в целом могут быть интерпретированы как задачи классификации моделей, описывающих функционирование объектов, на множестве параметров объекта и среды по входному состоянию экспертной системы в условиях воздействия неконтролируемых факторов (помехи, шумы и т. д.). Правильность данного утверждения становится особенно заметна при рассмотрении, с формальной точки зрения, функций принятия решений на этапе контроля технического состояния бортовых систем и эксплуатации изделий ракетно-космической техники. Отдельно стоит отметить, что к задаче классификации может быть сведена не только задача контроля, но также и ряд других задач, решаемых в ходе испытаний, например задача поиска места и причины неисправности, а при применении изделий РКТ по назначению – задача выбора модели, описывающей функционирование подсистем в том или ином режиме.

К настоящему времени разработано множество подходов для решения задачи классификации. Выбор подходящей стратегии принятия решений определяется свойствами процессов, которые должны контролироваться, и знаниями об этих свойствах. Поэтому в последнее время в задачах бортовой диагностики и управления изделиями РКТ наряду с широко распространенными методами принятия решений, основанными на использовании математических моделей наблюдаемых процессов, большой интерес вызывают различные неформальные подходы, основанные на использовании интеллектуальных технологий, в том числе на основе искусственных нейронных сетей, экспертных систем (ЭС) и нечеткой логики. Формализация функций поддержки и принятия решений с использованием правил логического вывода и нейронных сетей составляет ядро экспертной системы.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ

При выборе метода классификации моделей в зависимости от входного состояния ЭС основными критериями считаются точность и скорость работы алгоритма классификации. На сегодняшний день к основным эффективным методам классификации относятся следующие [3–6] (табл. 1):

- классификация с использованием корреляционного анализа;
- классификация, основанная на формуле Байеса;
- классификация с применением искусственных нейронных сетей;
- классификация, осуществляемая на базе нечеткой логики.

Таблица 1

Методы классификации

Способы классификации	Достоинства	Недостатки
Корреляционный анализ	Оперативность вычислений	Одинаковость корреляционных матриц в каждой группе; низкая точность классификации
Формула Байеса	Сложность практической реализации	Низкая точность классификации
Нейронные сети		
Сеть обратного распространения (многослойный персептрон)	Легкость программной или аппаратной реализации; простота алгоритма обучения, высокая точность классификации	Низкая скорость обучения; для увеличения скорости сходимости необходимо использовать матрицы вторых производных функции ошибки
Однослойный персептрон	Простой и быстрый алгоритм обучения; программная и аппаратная реализация	Примитивные разделяющие поверхности (гиперплоскости); невозможность решения сложных задач распознавания
Сеть встречного распространения (карта Кохонена и звезда Гроссберга)	Простота; высокая скорость обучения	Низкая точность аппроксимации
Гауссов классификатор	Простота программной и аппаратной реализации модели; высокая скорость алгоритма формирования синаптических весов и смещений	Примитивные разделяющие поверхности (гиперплоскости), следовательно, решение самых простых задач распознавания
Сеть Хэмминга	Простота и высокая скорость функционирования; независимость емкости сети от размерности задачи	Распознавание слабозашумленных сигналов; ограниченность области применения
Двухнаправленная ассоциативная память	Возможность построения ассоциаций между векторами различных размерностей; простота, скорость работы; возможность аппаратной реализации	Ограниченность емкости сети; ошибки в процессе функционирования
Машина Больцмана, Больцмановское обучение	Алгоритм дает возможность сети выбираться из локальных минимумов адаптивного рельефа	Медленный алгоритм обучения
Сеть Кохонена	Функционирование в условиях помех, так как число классов фиксировано	Заранее должно быть известно число кластеров
Сеть встречного распространения	Реализации ассоциативной памяти, сжатия данных; легкость обучения	Используются в качестве разделяющих поверхностей – гиперплоскости
Гибридные сети	Высокая точность, оперативность классификации	Сложная топология сети
Нечеткие системы		
Нечеткая логика		
Модель Мамдами – Заде	Аппроксимация функции с произвольной точностью	Процесс формирования правил в значительной степени зависит от размещения функции принадлежности
Модель Такаги – Сугено – Канга	Простота модели вывода	Эвристические (экспертные) правила задания функций принадлежности
Нечеткие «нейронные сети»		
Сеть TSK	Аппроксимация полиномом первого порядка	Эвристические (экспертные) правила задания функций принадлежности
Сеть Ванга – Менделя	Аппроксимация полиномом нулевого порядка	Эвристические (экспертные) правила задания функций принадлежности

Окончание табл. 1

Способы классификации	Достоинства	Недостатки
Нечеткие нейросетевые модели		
Кооперативные нечеткие нейросетевые системы	Взаимодействие нейронной сети и нечеткой системы	Сложность согласования и настройки для решения задач классификации
Гибридные нечеткие нейросетевые модели	Адаптивность, обучаемость, гибкость, относительно высокая точность	Эвристические (экспертные) правила задания функций принадлежности
Сети с нечеткой самоорганизацией в гибридной структуре	Декомпозиция решаемой задачи классификации, автоматическая настройка функций принадлежности; высокая точность классификации	Сложность анализа

Исходя из анализа табл. 1, для решения задачи классификации с точки зрения критерия максимума оперативности целесообразно использовать многослойный персептрон, сеть Кохонена и гибридные сети. С целью повышения эффективности решения задачи необходимо определять исходные данные, рациональную структуру и топологию нейросетевой системы.

Однако формирование входного состояния ЭС (характеризующего объект и среду) происходит при воздействии на параметры неконтролируемых факторов (помех, шумов и т. д.), т. е. возникает неопределенность в оценивании параметров традиционными методами. Использование идеи и теории нечетких множеств определяется необходимостью описания таких явлений и понятий, которые имеют многозначный и неточный характер [1, 2, 7]. Это позволяет также рассматривать аппарат нечеткой логики для решения задачи классификации. Все нечеткие системы можно представить в виде трех парадигм: нечеткая логика, нечеткие «нейронные сети», нечеткие нейросетевые модели. Недостатком нечетких систем является тот факт, что характеристики точности и качества нечеткой модели сильно зависят от формы и взаимного расположения функций принадлежности.

Интеграция обоих подходов в нечетких нейросетевых моделях позволяет, с одной стороны, внедрить обучающие способности и вычислительную мощь нейронных сетей и системы нечеткой логики, а с другой стороны – повысить интеллектуальные возможности нейронных сетей, присущие «человеческому» способу мышления, через применение нечетких правил для принятия решений при испытаниях изделий РКТ и их управлении. В последние годы данное объединение стало объектом активных исследований. Результатом этих усилий стали системы поддержки принятия решений, которые в различной степени реализуют концепцию нечеткого мышления в сочетании с заимствованной от нейронных сетей способностью к обучению.

В целом к нечетким нейросетевым моделям относятся кооперативные структуры, гибридные нечеткие нейросетевые структуры и сети, в которых присутствует нечеткий слой в рамках гибридной структуры. Необходимо отметить, что применительно для задачи испытаний изделий РКТ и их управления наибольший интерес представляют сети с нечетким слоем в гибридной структуре. Можно выделить следующие их ключевые свойства и особенности: возможность индуцирования набора решающих правил; ориентированность на определенный тип нечетких систем; использование алгоритмов обучения; возможность оперативного обучения; возможность перестройки структуры; сохранение заложенных в систему знаний и правил вывода; настройку множества параметров нечеткой модели на основе самоорганизации.

ФОРМИРОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Следует отметить, что процессы испытаний изделий РКТ и управления схожи по своему смысловому содержанию и определяются выбранной моделью. Целью испытаний является

определение технического состояния объекта, а целью управления – достижение целевого состояния согласно используемой модели. Различие заключается только в определении числа управляющих воздействий как при реализации тестового и функционального (рабочего) контроля, так и управления. В связи с этим рассмотрим только процесс испытаний изделий РКТ.

В общем случае изделие РКТ представляет собой сложный комплекс разнородных технических систем с очень сложной логикой работы. Невозможно организовать процессы испытаний изделий РКТ и управления ими в виде одной проверки определенной продолжительности или в виде выдачи управляющих воздействий, определенных одной моделью. В связи с этим выбирают путь формирования сеансов проверок определенной части изделий РКТ с учетом коэффициента полноты проверки используемой модели.

В свою очередь, для проведения испытаний модель объекта испытаний должна быть дополнена до модели «объект + среда», которая также содержит следующие компоненты: модель системы интеллектуальной обработки информации, включающую модели систем наблюдения и классификации; модель комплексного функционального контроля; модель системы телеметрических измерений, модель автономных проверок бортовых систем. В совокупности все представленные модели порождают основу для создания диагностического обеспечения, необходимого для решения задачи испытаний изделий РКТ на основе нечетких нейросетевых моделей.

В процессе разработки указанного обеспечения первоначально определяется состав модели системы интеллектуальной поддержки принятия решений. Модель создается в два этапа: на первом этапе формируется структура зависимости выбора модели от входных условий, учитывающих влияющие факторы, с использованием экспертного правила «ЕСЛИ – ТО». На втором этапе производится настройка нечеткого слоя модели, что позволяет минимизировать расхождения между модельными и экспериментальными результатами, тем самым повышая достоверность принимаемых решений. Структура модели системы интеллектуальной поддержки принятия решения при проведении испытаний изделий РКТ представлена в виде дерева на рис. 1, где висячими вершинами являются факторы, влияющие на выбор модели контроля подсистем в процессе проведения проверок в различных режимах.

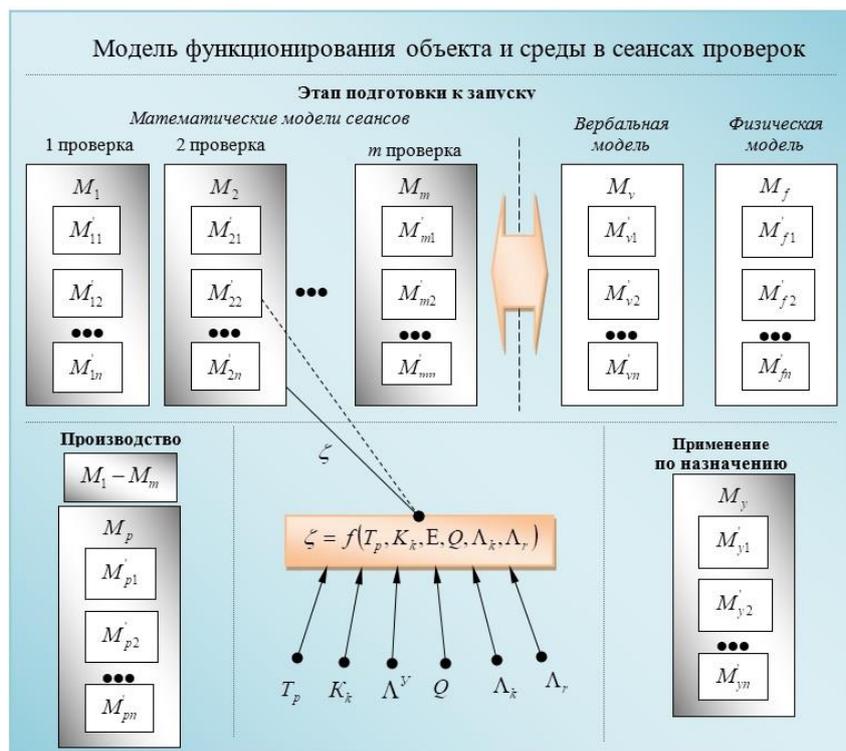


Рис. 1. Дерево влияющих факторов

Уникальность данной модели заключается в том, что она учитывает как факторы объекта испытаний, так и условия эксплуатации (среду). Все влияющие факторы сведены в табл. 2, они рассматриваются как лингвистические переменные, заданные на соответствующих универсальных множествах, и оцениваются нечеткими терминами. Применение модели нечеткого нейросетевого логического вывода позволяет выбирать адекватную модель при изменении входного состояния экспертной системы в зависимости от влияющих факторов (параметров системы «объект + среда»), которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Таблица элементов факторного пространства

Номер фактора	Фактор	Универсальное множество	Термы для оценок
x_1	T_p – тип проверки	$(0-100)\%$	Нормальная; форсированная; сокращенная
x_2	K_k – критерий контроля		Достоверность: – высокая; – требуемая Ресурсоемкость: – низкая; – нормальная; – высокая
x_3	Λ^y – параметры условий проведения испытаний		За пределами (испытания недопустимы); ниже нормы; нормальные (средние) значения; выше нормы; за пределами (испытания недопустимы)
x_4	Q – показатель качества БА КА	$(0-100)\%$	Низкий; в норме; высокий
x_5	Λ_k – параметры кондиции БА		За пределами (авария); ниже нормы; нормальные (средние) значения; выше нормы; за пределами (авария)
x_6	Λ_r – ресурсные параметры БА		В полном объеме; выше среднего; средний объем; ниже среднего; низкий уровень; равны нулю

Следующим этапом является формирование базы знаний, которая представлена множеством продукционных правил нечеткой системы, разрабатываемых специалистами предметной области.

Следует отметить, что факторное пространство системно представляет состояние объекта и среды: переменные x_1-x_3 характеризуют воздействие внешних условий испытаний; x_4-x_6 – внутреннее состояние систем изделий РКТ. В комплексе же они, по мнению эксперта, в достаточной степени характеризуют техническое состояние системы «объект + среда».

На этапе выбора и формализации обобщенного параметра технического состояния (ОПТС) вводится ранжированная шкала оценивания ТС системы «объект + среда».

Для реализации указанной задачи может быть осуществлено разбиение области определения Y (рис. 2) на участки в интервале $[0,1]$, где условным описательным характеристикам, полученным путем диалога с экспертами, поставлены в соответствие количественные значения с нечеткими границами (табл. 3). Выбор количества интервалов обусловлен рекомендациями специалистов-экспертов. В табл. 3 показано ранжирование ОПТС типовой бортовой системы космического аппарата (информационно-телеметрической системы БР-91Ц) с учетом неопределенности и нечеткости границ.

Поскольку нечеткость исходной информации обуславливает нечеткость предполагаемых выводов, то ее терм-множества возможных значений пересекаются по всей области определения.

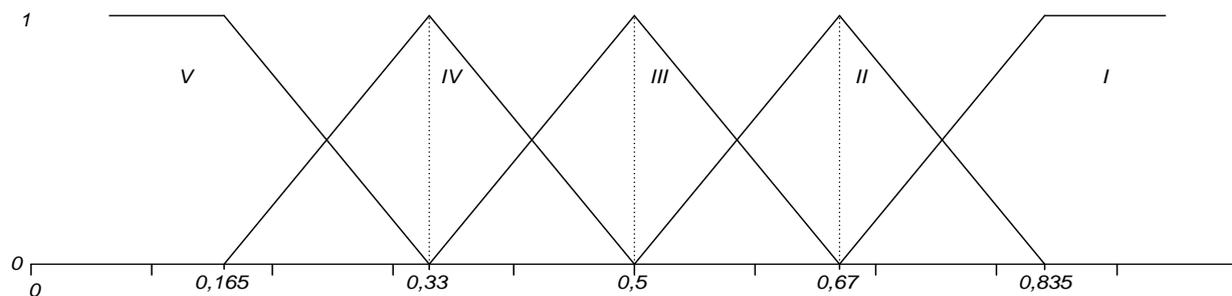


Рис. 2. Представление Y в виде лингвистической переменной

Таблица 3

Выходные функции принадлежности нечеткого слоя

Кластеризация нечетким слоем					Результат классификации
Граница интервала	Мода интервала	Наименование терм-множества	Характеристики состояния	Косвенные признаки изменения состояния	
1–0,67	0,835	Выше нормы	Фактические значения всех параметров, характеризующих ТС, несколько превышают значения, установленные в эксплуатационной документации (ЭД)	Изделие эксплуатируется в пределах гарантийных сроков, при этом условия и режимы их эксплуатации соответствуют штатным. Значения всех показателей, прямо или косвенно характеризующих ТС, несколько превышают указанные в нормативно-технической (НТД) и в ЭД	M^{Φ}
0,84–0,5	0,67	Норма	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС, в основном соответствуют значениям, установленным в ЭД на изделие. Незначительные замечания по результатам обследования устраняются на месте в незначительном объеме восстановительных работ	Изделие эксплуатируется в пределах гарантийных сроков, при этом условия и режимы их эксплуатации соответствуют штатным. Значения основных показателей прямо или косвенно характеризующих ТС соответствуют требованиям НТД и ЭД.	M^{Φ}
0,67–0,33	0,5	Ниже нормы, в пределах допуска	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС, незначительно ниже значений, установленных в ЭД, но позволяют дальнейшие испытания при условии проведения восстановительных мероприятий на месте	Сроки эксплуатации изделия близки к завершению гарантийных, при этом условия и режимы их эксплуатации могут быть несколько интенсивнее штатных. Оценка значений основных параметров, прямо или косвенно характеризующих ТС, позволяют говорить о незначительном их снижении по сравнению с требованиями НТД и ЭД	M^{Φ}
0,5–0,16	0,33	Предельное состояние	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС, не соответствуют установленным в ЭД на изделие (необходимо проведение РВР на предприятии-изготовителе)	Изделие эксплуатируется за пределами гарантийных сроков в соответствии с решением по продлению сроков. Вследствие длительной или интенсивной эксплуатации, значения основных параметров, прямо или косвенно характеризующих ТС, не позволяют дальнейшую эксплуатацию изделия в составе специальной аппаратуры	M^{HC}
0,33–0	0,165	Дальнейшая эксплуатация недопустима	Фактические значения основных параметров, характеризующих ТС, не соответствуют установленным в ЭД на изделие, проведение РВР на предприятии-изготовителе	Изделие эксплуатируется за пределами гарантийных сроков. Вследствие неправильной или интенсивной эксплуатации, значения параметров, прямо или косвенно характеризующих ТС, не позволяют эксплуатировать изделие в составе специальной аппаратуры. Предварительная оценка ТС изделия показывает, что проведение РВР позволит восстановление работоспособности изделия в целом или восстановление работоспособного состояния изделия	M^{HC}

В нечетком виде выходной фактор Y представлен на рис. 2. При попадании в зону неопределенности результирующее значение оценки будет отнесено к интервалу с более жесткой характеристикой.

В виде лингвистических переменных компоненты факторного пространства x_5 представлены на рис. 3.

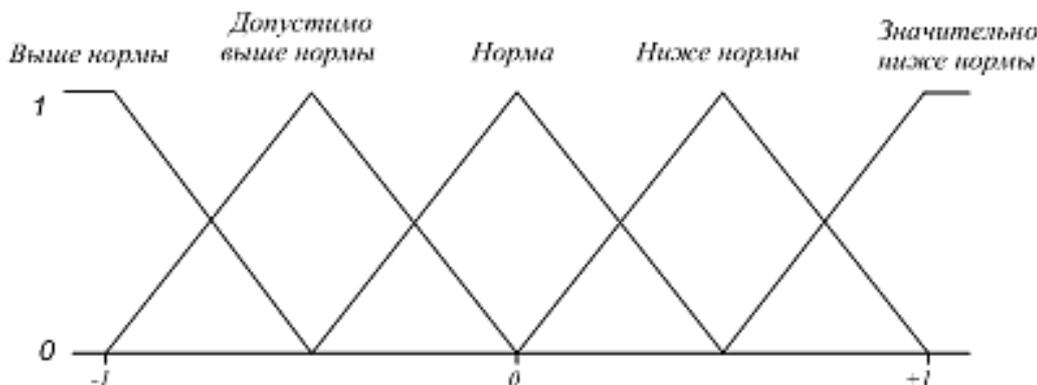


Рис. 3. Представление элементов факторного пространства в виде лингвистической переменной

Все остальные элементы факторного пространства также представлены в виде лингвистических переменных.

Следующим шагом в разработке модели является создание матрицы экспертного опроса, фрагмент которой представлен в табл. 4. Нечеткая модель формируется на основе обработки и анализа матрицы экспертного опроса, при этом применяется структура полного факторного пространства типа 2^n , где n обозначает количество факторов. В данной ситуации экспертом установлено количество переменных факторного пространства, т. е. $n = 10$.

Преимущества опросной матрицы заключается в ее ортогональности и ротатабельности, что хорошо согласуется с интуитивными знаниями экспертов и позволяет формализовать их в рамках нейро-нечеткой модели.

Таблица 4

Фрагмент опросной матрицы с оценками эксперта

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	Y
1	Выше нормы	Ниже нормы	Допустимо ниже нормы	Ниже нормы	Допустимо ниже нормы	Проверка режимов, переключения	Признаки отсутствуют	Ниже нормы	Допустимо ниже нормы	Дальнейшая эксплуатация недопустима
2	Значительно ниже нормы	Ниже нормы	Допустимо ниже нормы	Ниже нормы	Допустимо ниже нормы	Проверка режимов, переключения	Характерные допустимые признаки	Ниже нормы	Допустимо ниже нормы	Дальнейшая эксплуатация недопустима
...
...
1024	Норма	Незначительно ниже нормы	Норма	Норма	Норма	Переключения устройств	Незначительные признаки	Норма	Норма	Ниже нормы, в пределах допуска

По результатам обработки данных матрицы формируется обучающая выборка для нейронной сети, входящей в общую нейро-нечеткую модель.

Настройка модели производится с помощью обучающей выборки, которая представляет собой совокупность пар «влияющие факторы – модель» (рис. 4). Данный процесс включает

два этапа. На первом этапе производится формирование функций принадлежности по параметрам объекта и среды, обучение нейронных сетей на эталонные значения входных образов (параметры, характеристики), а на втором этапе осуществляется применение данного классификатора в экспертной системе при принятии решения по выбору класса моделей в зависимости от значений параметров объекта и среды.

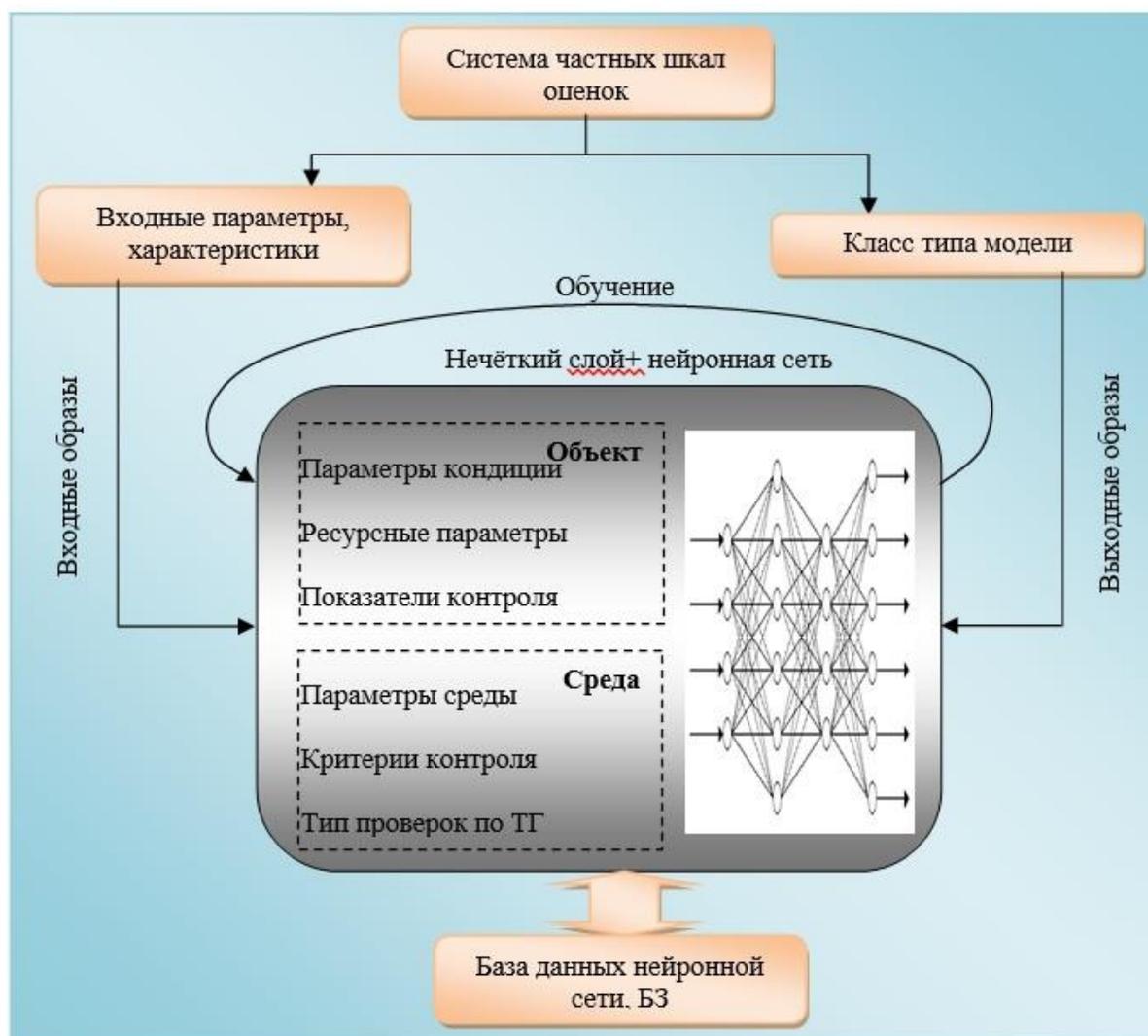


Рис. 4. Общая схема обучения нейронных сетей с нечетким слоем

Таким образом, представлен процесс наполнения компонентов нейро-нечеткой модели системы обработки информации при решении задачи классификации в процессе организации структуры испытаний по сеансам проверяемых бортовых радиоэлектронных систем изделий РКТ.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как было описано выше, при испытаниях изделий РКТ или их элементов возникают возмущающие факторы, которые носят, в основном, случайный характер. Воздействие на бортовую систему этих факторов приводит к тому, что определяемые в ходе испытаний показатели надежности являются приближенными. Таким образом, по результатам испытаний

находятся не действительные показатели надежности опытного или серийного образца, а только их оценки.

Результаты проведенных исследований в виде значений рассчитанных оценок представлены на рис. 5. На рис. 5,а представлена точечная оценка показателя безотказной работы и СКО оценки. Временные соотношения различных подходов представлены на рис. 5,б.

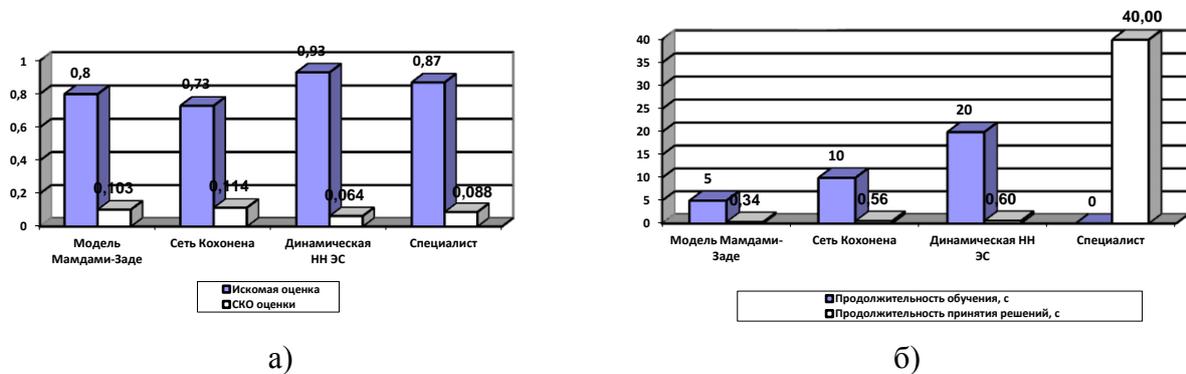


Рис. 5. Показатели качества (а) и временные характеристики (б)

Таким образом, экспертная система на основе нечетких нейросетевых правил логического вывода характеризуется лучшими значениями точечной оценки вероятности безотказной работы в ходе проведенного эксперимента. Однако наблюдается рост времени обучения нейро-нечеткой сети из-за двухэтапного обучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования формирования нечетких правил логического вывода для поддержки принятия решений при испытаниях и эксплуатации изделий ракетно-космической техники позволили:

- обосновать применение модели нечеткого нейросетевого логического вывода для выбора адекватной модели при изменении входного состояния экспертной системы в зависимости от влияющих факторов;
- получать выходные функции принадлежности нечеткого слоя по косвенным признакам изменения состояния;
- формировать на основе опросной матрицы с оценками эксперта обучающую выборку для обучения нейронной сети;
- проводить классификацию моделей по входным параметрам объекта и среды.

Таким образом, использование предложенных решений дает возможность решать задачу адекватного выбора моделей при изменении параметров объекта и среды и позволяет разработать алгоритмы оперативного управления процессами испытаний и управления при применении по назначению изделий РКТ. При этом требуемые показатели эффективности достигаются за счет привлечения дополнительных знаний экспертов предметной области и свойств параллельной обработки информации нейронными сетями

Список используемых источников

1. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.

2. *В. И. Полянский, А. Б. Кузнецов* Выбор формальной модели представления знаний для решения задач бортового диагностирования // Известия вузов. Приборостроение. – 1997. – Т. 40, № 8. – С. 51–54
3. *Дмитриев А. К., Юсупов Р. М.* Идентификация и техническая диагностика. – МО СССР, 1987. – 525 с.
4. *Дунаев В. В.* Классификационные основы теории испытаний / под ред. В. И. Белицкого. – МО СССР, 1984. – 145 с.
5. *Зозуля Ю. И.* Интеллектуальные нейросистемы. – М. : Радиотехника, 2003. – Кн. 12. – 144 с.
6. *Барановский А. М., Привалов А. Е.* Система контроля и диагностирования бортового оборудования малого космического аппарата // Приборостроение. – 2009. – № 4. – С. 51–56.
7. *Штовба С. Д.* Проектирование нечетких систем средствами Matlab. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.

Л. А. Маслова¹;

С. М. Мужичек¹,

доктор технических наук, профессор;

А. К. Савенко¹;

А. А. Скрынников^{1,2},

кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

С. В. Хрулин¹

¹Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, г. Москва.

²Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет), г. Москва.

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОЦЕНКЕ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ УДАРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ОСКОЛКАМИ СОБСТВЕННЫХ БОМБ

Предложен подход к организации вычислительного эксперимента по оценке опасности поражения беспилотного летательного аппарата осколками собственных авиационных бомб в заданных условиях боевого применения. Задача оценки опасности формализована как задача теории статистических выводов – задача проверки гипотезы о вероятности редкого случайного события при сложной альтернативной гипотезе. Обосновано применение рандомизированного правила принятия решения по результатам вычислительных экспериментов. Обоснован требуемый объем выборки. Приведен пример определения требуемого объема выборки и формулировки решающего правила при проверке гипотезы о безопасности заданных условий бомбометания с БЛА при заданных значениях уровня значимости, мощности и предельно допустимой вероятности поражения БЛА осколками собственных АБ.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, бомбометание, безопасность боевого применения, математическая статистика.

ВВЕДЕНИЕ

В состав авиационного вооружения современных ударных беспилотных летательных аппаратов (БЛА), помимо управляемого авиационного вооружения, входят боеприпасы бомбардировочного вооружения, в частности фугасные и осколочно-фугасные неуправляемые (свободнопадающие) авиационные бомбы (АБ) калибра 100, 250 и 500 кг. Современные прицельно-навигационные системы обеспечивают высокую точность попадания АБ в наземную цель, что в сочетании с большой мощностью поражающего действия АБ позволяет с высокой эффективностью применять их по различным наземным целям.

Диапазон условий боевого применения АБ в значительной степени определяется требованиями безопасности. При бомбометании существует опасность попадания в летательный аппарат (ЛА) осколков собственных АБ. Формирующиеся при подрыве АБ осколки имеют высокую начальную скорость, вследствие чего способны подниматься на высоту в несколько сотен метров. В случае попадания в ЛА-носитель или в другой ЛА группы (при групповом применении ЛА) осколок может нанести повреждения, которые, в свою очередь, могут привести к поражению ЛА [1].

Для пилотируемых ЛА выдвигаются требования абсолютной безопасности: ни один из осколков не должен попасть в ЛА. Это требование реализуется заданием минимально допустимой высоты бомбометания, которая должна быть больше, чем высота подъема так называемого «лидирующего» осколочка, т. е. такого осколочка, который имеет наилучшее сочетание массы, начальной скорости и аэродинамической формы.

Применительно к БЛА (у них нет на борту экипажа) отсутствует необходимость предъявлять требования абсолютной безопасности.

Проведенный анализ возможных потерь БЛА на этапе преодоления ПВО противника позволил сформулировать концепцию приемлемого риска потери ударного БЛА за счет поражения его осколками собственных АБ [2]. В качестве фонового риска выбран риск поражения БЛА за счет противодействия средствами ПВО противника. Определены понятия и типы поражения БЛА при действии осколков собственных АБ [2, 3].

Применение предложенной концепции приемлемого риска позволяет численно определить допустимую вероятность поражения БЛА осколками собственных АБ, которая, в зависимости от интенсивности противодействия ПВО противника, имеет значения порядка 10^{-4} – 10^{-3} . Тогда путем имитационного моделирования можно из всей области возможных условий бомбометания выделить область, в которой обеспечивается безопасность, т. е. вероятность поражения БЛА осколками собственных АБ не превысит предельно допустимого значения.

Оценка вероятности поражения БЛА осколками собственных АБ в заданных условиях боевого применения проводится с использованием имитационного моделирования. При проведении комплексного имитационного моделирования рассматривается полет БЛА-носителя, полет и подрыв АБ, формирование и разлет осколочного поля, покрытие осколками БЛА, а также возможность поражения БЛА по тому или иному типу поражения.

В каждой реализации статистической модели фиксируется факт поражения БЛА. Вероятность такого случайного события в области безопасных условий бомбометания очень мала. Такие события называют редкими событиями.

Статистическое моделирование, проводимое для оценки вероятности редких событий, предполагает достаточно большой объем выборки. Но каждая реализация получается в результате комплексного сквозного моделирования, требующего больших затрат машинного времени. В этой связи возникает задача обоснования необходимого объема испытаний имитационной модели для получения надежных оценок вероятностей рассматриваемых редких событий. Другой задачей является интерпретация получаемых данных: какие должны быть сделаны выводы по результатам моделирования в случае того или иного числа «успехов» при заданном объеме выборки.

В статье предлагается правило принятия решения по результатам статистического моделирования редких событий, построенное с использованием теории статистических решений. Требуемый объем выборки определяется из условия обеспечения заданной мощности при проверке статистической гипотезы о вероятности редкого события.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Условия боевого применения АБ с БЛА задаются высотой сброса АБ, скоростью БЛА в момент сброса, углом пикирования и другими параметрами [4, 5].

В соответствии с концепцией приемлемого риска безопасными условиями бомбометания являются такие, при которых риск поражения БЛА осколками собственных АБ не превысит заданное значение p_0 .

Для того чтобы определить, являются ли рассматриваемые условия бомбометания безопасными, с использованием комплексной имитационной модели проводится статистическое моделирование, при котором в каждой реализации фиксируется, произошло ли случайное событие A – поражения БЛА осколками собственных АБ. Индикатором события A является случайная величина X , принимающая значение 1, если в опыте событие A произошло, и 0 – если не произошло. Случайная величина X имеет функцию распределения $F(x)$ и подчиня-

ется закону распределения Бернулли с параметром p , означающим вероятность появления события A в единичном опыте.

В результате вычислительного эксперимента формируется выборка – реализация (x_1, x_2, \dots, x_n) случайной выборки (X_1, X_2, \dots, X_n) , где X_1, X_2, \dots, X_n – независимые одинаково распределенные случайные величины с функцией распределения $F(x)$.

Задача подтверждения безопасности в рассматриваемых условиях бомбометания сводится к задаче проверки статистической гипотезы о параметре p : выдвигается предположение (гипотеза) о том, что значение неизвестного параметра p закона распределения случайной величины X не превышает предельно допустимое значение p_0 .

По полученной в результате имитационного моделирования выборке (x_1, x_2, \dots, x_n) необходимо проверить статистическую гипотезу

$$H_0: p = p_0 \quad (1)$$

против альтернативной гипотезы

$$H_1: p > p_0. \quad (2)$$

Необходимо обосновать решающее правило при проверке гипотезы (1) против альтернативной гипотезы (2) с учетом следующих особенностей:

- событие A является редким;
- альтернативная гипотеза – сложная.

При редких событиях, даже при сравнительно больших объемах выборки, закон распределения суммарного числа «успехов» не является нормальным – в этом случае применяется распределение Пуассона. При обосновании решающего правила для сложной гипотезы необходимо использование равномерно наиболее мощного критерия.

Объем выборки n должен быть минимальным, но при этом должен обеспечить требуемую надежность оценки неизвестного параметра p .

Таким образом, задача заключается в организации вычислительного эксперимента, под которой понимается определение требуемого объема выборки и обоснование решающего правила при проверке гипотезы о вероятности редкого события при сложной альтернативной гипотезе, что позволит провести оценку опасности поражения ударного БЛА осколками собственных бомб в заданных условиях боевого применения.

ОБОСНОВАНИЕ РЕШАЮЩЕГО ПРАВИЛА ПРИ ПРОВЕРКЕ ГИПОТЕЗЫ О ВЕРОЯТНОСТИ РЕДКОГО СОБЫТИЯ ПРИ СЛОЖНОЙ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ГИПОТЕЗЕ

Рассматриваемая гипотеза – параметрическая; гипотеза H_0 – простая (так как она полностью определяет распределение случайной величины X), гипотеза H_1 – сложная (так как при $p > p_0$ задается множество распределений). Формулировка выдвигаемой гипотезы в виде равенства обусловлена тем, что она не будет отвергаться при $p < p_0$; критическая область – правосторонняя.

Правило, по которому по реализации (x_1, x_2, \dots, x_n) принимается решение, согласуется ли гипотеза H_0 с результатами эксперимента, называется *статистическим критерием*. При применении статистического критерия возможны ошибки: ошибка первого рода (когда отвергается верная гипотеза H_0 в пользу альтернативной гипотезы H_1) и ошибка второго рода (принимается гипотеза H_0 , когда она неверна). Вероятности совершения ошибки пер-

вого и второго рода обозначают α и β соответственно. Вероятность α называют уровнем значимости; вероятность $(1 - \beta)$ – мощностью критерия.

Критерий Неймана – Пирсона для проверки статистических гипотез строится из условия максимизации мощности $(1 - \beta)$ при фиксированном уровне вероятности ошибки первого рода α . При решении задачи проверки простой гипотезы $H_0: p = p_0$ против простой альтернативной гипотезы $H_1: p = p_1$ наиболее мощным критерием (в соответствии с леммой Неймана – Пирсона) является критерий отношения правдоподобия [7–9].

Если событие A не редкое (вероятность p не близка к нулю или единице), то закон распределения случайной величины

$$Y = \sum_{i=1}^n X_i$$

достаточно быстро сходится к нормальному, а при неограниченном увеличении n в соответствии с центральной предельной теоремой неограниченно приближается к нормальному [6]. При этом числовые характеристики (при условии, что гипотеза H_0 верна) определяются по формулам:

$$M[Y | H_0] = np_0; \quad \sigma[Y | H_0] = \sqrt{np_0(1 - p_0)}.$$

Для проверки гипотезы H_0 можно воспользоваться статистикой

$$Z = \frac{Y - M[Y | H_0]}{\sigma[Y | H_0]}.$$

Статистика Z имеет стандартное нормальное распределение. Критическая область – правосторонняя; при заданном уровне значимости α гипотеза H_0 отклоняется, если $z > z_{1-\alpha}$, где $z_{1-\alpha}$ – квантиль порядка $(1 - \alpha)$.

Мы же имеем дело со случайным событием, вероятность которого близка к нулю. В этом случае, если число испытаний n велико, случайная величина Y хорошо описывается законом распределения Пуассона:

$$P(Y = y) = \frac{\lambda^y}{y!} e^{-\lambda},$$

где $\lambda = np$.

Рассмотрим сначала *случай, когда альтернативная гипотеза – простая*:

$$H_1: p = p_1,$$

где $p_1 > p_0$.

Закон распределения случайной величины X (закон распределения Бернулли) определяется параметром p :

$$P(X = x) = p^x (1 - p)^{1-x},$$

где $x = 0, 1$.

Тогда функция правдоподобия $L(x_1, x_2, \dots, x_n; p)$, описывающая совместное распределение наблюдений

$$L(x_1, \dots, x_n; p) = \prod_{i=1}^n P(X = x_i)$$

и рассматриваемая как функция параметра p при фиксированных значениях x_1, x_2, \dots, x_n , будет иметь вид

$$L(x_1, \dots, x_n; p) = \prod_{i=1}^n p^{x_i} (1-p)^{1-x_i} = p^{\sum x_i} (1-p)^{n-\sum x_i},$$

а отношение правдоподобия – вид

$$\varphi(x_1, \dots, x_n) = \frac{L(x_1, \dots, x_n; p_1)}{L(x_1, \dots, x_n; p_0)} = \frac{p_1^{\sum x_i} (1-p_1)^{n-\sum x_i}}{p_0^{\sum x_i} (1-p_0)^{n-\sum x_i}} = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\sum x_i} \left(\frac{1-p_1}{1-p_0}\right)^{n-\sum x_i}. \quad (3)$$

Так как при любом $p_1 > p_0$

$$\frac{p_1}{p_0} > 1, \quad \frac{1-p_1}{1-p_0} < 1,$$

то чем больше $\sum X_i$, тем больше отношение правдоподобия $\varphi(X_1, \dots, X_n)$, т. е. отношение $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ является монотонной функцией $\sum X_i$. Поэтому критическая область будет правосторонней – гипотеза H_0 отвергается при $\varphi(X_1, \dots, X_n) \geq C_\varphi$, где значение C_φ определяется исходя из условия $P\{\varphi(X_1, \dots, X_n) \geq C_\varphi | H_0\} = \alpha$.

Неравенство $\varphi(X_1, \dots, X_n) \geq C_\varphi$ выполняется при $\sum X_i \geq C$, где значение константы C определяется из условия

$$P\left\{\sum_{i=1}^n X_i \geq C \mid p = p_0\right\} = \alpha. \quad (4)$$

В случае, если гипотеза H_0 верна, условие (4) будет иметь вид

$$\sum_{i=C}^n P(Y=i) = \sum_{i=C}^n \frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda} = \alpha, \quad (5)$$

где $\lambda = np_0$.

В том случае, если обе гипотезы о параметре распределения некоторой случайной величины являются сложными или сложной является одна из них, то строится так называемый равномерно наиболее мощный критерий.

Вернемся к рассматриваемой задаче, когда **альтернативная гипотеза – сложная**.

Определим некоторое фиксированное значение $p_1 > p_0$ параметра p и рассмотрим две простые гипотезы: $H_0: p = p_0$ и $H_1: p = p_1$, $p_1 > p_0$. Согласно лемме Неймана – Пирсона существует наиболее мощный критерий, основанный на статистике отношения правдоподобия $\varphi(x_1, \dots, x_n)$ (3), которая зависит от параметров p_0 и p_1 . Однако критическая область при заданном уровне значимости α , определяемая на основании соотношения (4), зависит только от значения p_0 и не зависит от значения p_1 . Таким образом, критерий (5) является равномерно наиболее мощным критерием проверки простой гипотезы $H_0: p = p_0$ против сложной альтернативной гипотезы $H_1: p > p_0$.

Однако, так как случайная величина $Y = \sum X_i$, подчиняющаяся распределению Пуассона, дискретна, то трудно подобрать такое значение C , при котором равенство (5) выполняется. В этом случае можно использовать рандомизированный критерий.

С использованием функции распределения $F(y) = P(Y \leq y)$, построенной при $p = p_0$, можно найти квантиль $y_{1-\alpha}$ порядка $(1-\alpha)$. Тогда правило принятия решения по результатам вычислительных экспериментов заключается в следующем.

Если суммарной число «успехов» u меньше значения $y_{1-\alpha}$, то принимается гипотеза H_0 .

Если суммарное число «успехов» y больше значения $y_{1-\alpha}$, то принимается гипотеза H_1 .

В случае, если суммарное число «успехов» совпадает со значением $y_{1-\alpha}$, то по формуле

$$P(B) = \frac{F(y_{1-\alpha}) - (1-\alpha)}{F(y_{1-\alpha}) - F(y_{1-\alpha} - 1)} \quad (6)$$

рассчитывается вероятность случайного события B и проводится единичный розыгрыш этого события. Если событие B в этом розыгрыше произошло, то принимается гипотеза H_1 ; в противном случае принимается гипотеза H_0 .

При многократном применении данного решающего правила вероятность ошибки первого рода будет в точности равна α :

$$\begin{aligned} & P(Y = y_{1-\alpha})P(B) + (1 - F(y_{1-\alpha})) = \\ & = [F(y_{1-\alpha}) - F(y_{1-\alpha} - 1)] \frac{F(y_{1-\alpha}) - (1-\alpha)}{F(y_{1-\alpha}) - F(y_{1-\alpha} - 1)} + (1 - F(y_{1-\alpha})) = \alpha. \end{aligned}$$

Блок-схема применения рандомизированного критерия при проверке простой гипотезы $H_0: p = p_0$ против сложной правосторонней альтернативной гипотезы $H_1: p > p_0$ показана на рис. 1.

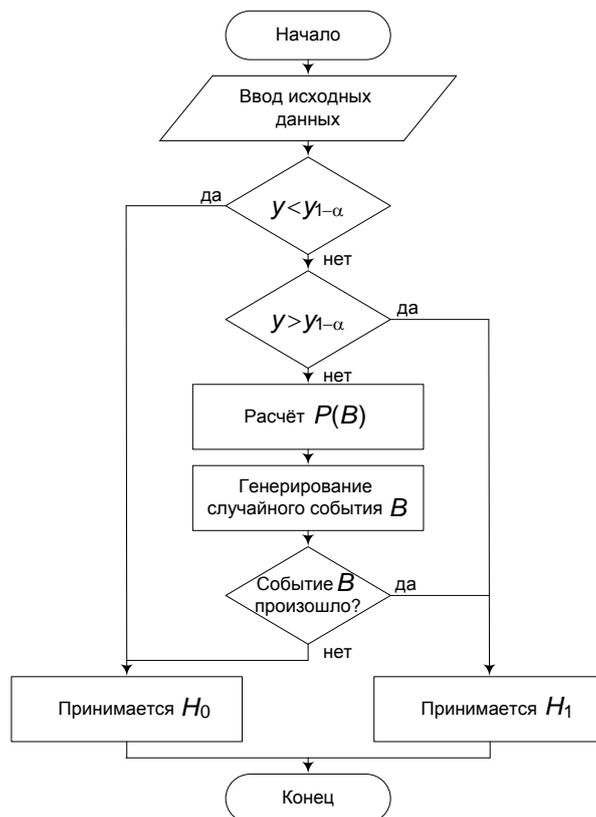


Рис. 1. Блок-схема применения рандомизированного критерия

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБУЕМОГО ОБЪЕМА ВЫБОРКИ

Рассмотрим случай, когда *альтернативная гипотеза – простая, а вероятность p_0 не близка к нулю и единице:*

$$H_1: p = p_1,$$

где $p_1 > p_0$. В этом случае при большом числе опытов случайная величина Y имеет нормальное распределение с параметрами:

$$M[Y | H_0] = np_0; \quad \sigma[Y | H_0] = \sqrt{np_0(1-p_0)}$$

при условии, что верна гипотеза H_0 , и

$$M[Y | H_1] = np_1; \quad \sigma[Y | H_1] = \sqrt{np_1(1-p_1)}$$

при условии, что верна гипотеза H_1 (рис. 2).

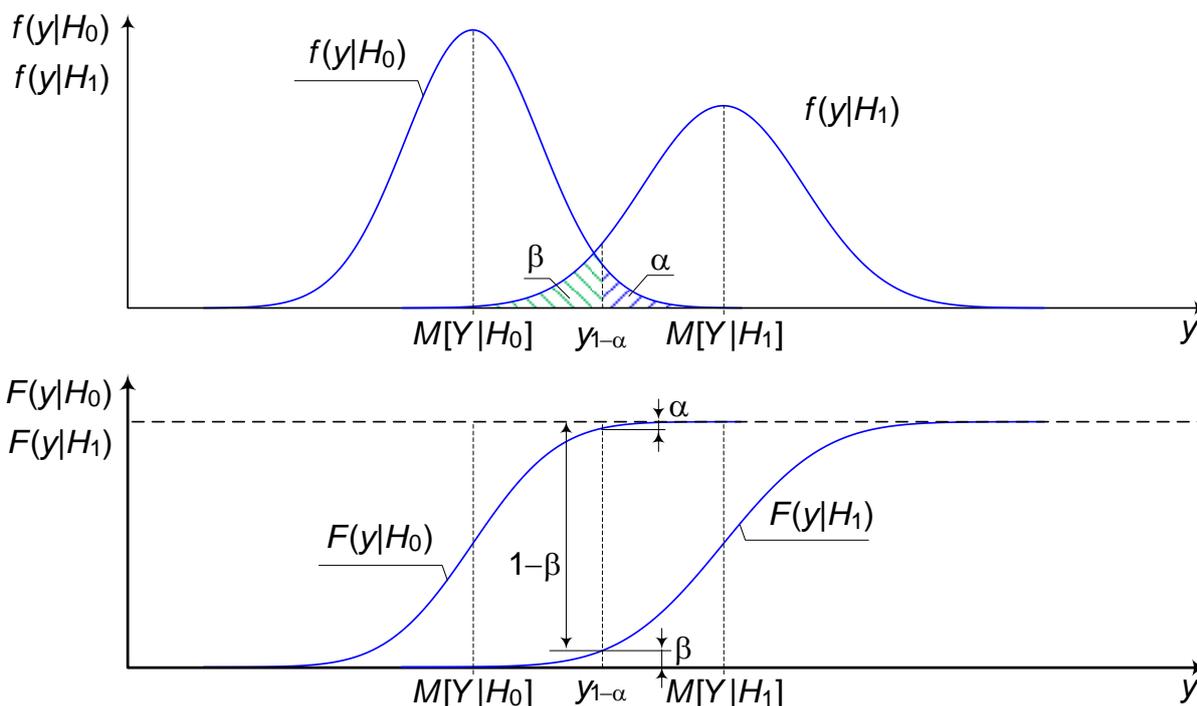


Рис. 2. Закон распределения случайной величины Y

Критическое значение $y_{1-\alpha}$, отделяющее область допустимых значений от критической области, может быть определено из соотношения

$$\begin{aligned} y_{1-\alpha} &= F_0^{-1}(1-\alpha) = M[Y | H_0] + \sigma[Y | H_0]z_{1-\alpha} = \\ &= M[Y | H_0] + \sigma[Y | H_0](-z_\alpha) = np_0 - z_\alpha \sqrt{np_0(1-p_0)}, \end{aligned}$$

где $F_0^{-1}(\cdot)$ – функция, обратная функции распределения $F(y | H_0)$.

Обозначим: Z – случайная величина, имеющая стандартное нормальное распределение с функцией распределения $\Phi(z) = P(Z < z)$; z_α и z_β – квантили случайной величины Z порядка α и β соответственно, при этом $\Phi(z_\alpha) = \alpha$, $\Phi(z_\beta) = \beta$.

Так как

$$\beta = F(y_{1-\alpha} | H_1) = \Phi\left(\frac{y_{1-\alpha} - np_1}{\sqrt{np_1(1-p_1)}}\right) = \Phi\left(\frac{np_0 - z_\alpha \sqrt{np_0(1-p_0)} - np_1}{\sqrt{np_1(1-p_1)}}\right),$$

то можно записать:

$$\Phi(z_\beta) = \Phi\left(\frac{np_0 - z_\alpha \sqrt{np_0(1-p_0)} - np_1}{\sqrt{np_1(1-p_1)}}\right),$$

откуда

$$z_\beta = \frac{np_0 - z_\alpha \sqrt{np_0(1-p_0)} - np_1}{\sqrt{np_1(1-p_1)}}. \tag{7}$$

Решая формулу (7) относительно n , получим

$$n = \frac{(z_\alpha \sqrt{np_0(1-p_0)} + z_\beta \sqrt{np_1(1-p_1)})^2}{(p_1 - p_0)^2}. \tag{8}$$

Пусть, например, $p_0 = 0,3$, $p_1 = 0,4$. Заданы уровень значимости и мощность: $\alpha = 0,05$, $(1-\beta) = 0,9$. При таких исходных данных объем выборки должен быть не менее 191.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда **альтернативная гипотеза – простая, а вероятность p_0 близка к нулю**. В этом случае при большом числе опытов случайная величина Y имеет распределение Пуассона с параметром λ : $\lambda = np_0$, если верна гипотеза H_0 , и $\lambda = np_1$, если верна гипотеза H_1 .

Критическое значение $y_{1-\alpha}$ определяется из соотношения

$$y_{1-\alpha} = F_0^{-1}(1-\alpha), \tag{9}$$

где $F_0^{-1}(\cdot)$ – функция, обратная функции распределения (рис. 3)

$$F(y | H_0) = P(Y \leq y | H_0) = \sum_{i=0}^y \frac{(np_0)^i}{i!} e^{-np_0}.$$

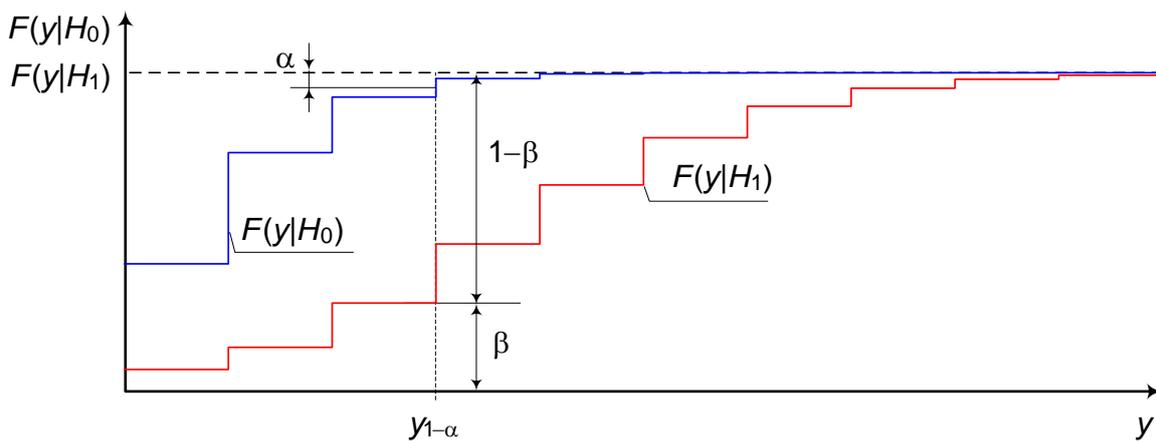


Рис. 3. Функция распределения случайной величины Y при близкой к нулю вероятности p_0

Тогда величина ошибки второго рода β будет равна значению $F(y_{1-\alpha} - 1 | H_1)$, а мощность $1-\beta = 1 - F(y_{1-\alpha} - 1 | H_1)$.

На рис. 4 в качестве примера приведена зависимость мощности $(1-\beta)$ от объема выборки n . Как видно из рисунка, зависимость $(1-\beta)(n)$ имеет пилообразную форму, что

обусловлено дискретностью рассматриваемой случайной величины Y и, как следствие, ступенчатой ее функцией распределения.

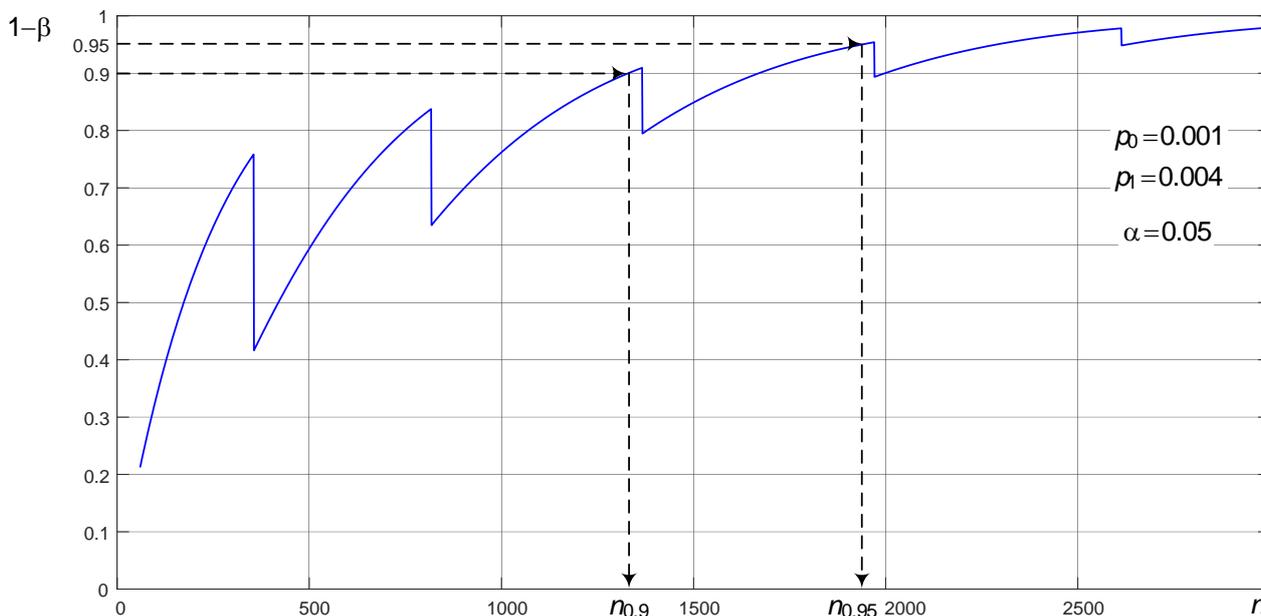


Рис. 4. Типовая зависимость мощности $(1-\beta)$ от объема выборки n

Для определения требуемого объема выборки из зависимости $(1-\beta)(n)$ необходимо найти такое минимальное значение аргумента n , при котором функция $(1-\beta)$ принимает заданную величину. Так, при $p_0 = 0,001$ и $p_1 = 0,004$ для достижения мощности $(1-\beta) = 0,9$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ потребуется выборка объемом $n = 1331$, а для достижения мощности $(1-\beta) = 0,95$ – выборка объемом $n = 1939$ (рис. 4). Вернемся теперь к интересующему нас случаю, когда **альтернативная гипотеза – сложная, а вероятность p_0 близка к нулю.**

Ввиду того, что при сложной альтернативной гипотезе нельзя говорить о мощности, при решении задачи определения объема выборки предлагается из множества значений p_1 ($p_1 > p_0$) выбрать некоторое значение $p_1 = kp_0$ и по этому значению судить о мощности критерия. Анализ зависимости мощности от коэффициента k показал, что значение k целесообразно принять как $k = 4$.

Таким образом, объем выборки при проверке простой гипотезы $H_0: p = p_0$ против сложной правосторонней альтернативной гипотезы $H_1: p > p_0$ при малых значениях вероятности p_0 предлагается выбирать таким, при котором мощность при проверке простой гипотезы $H_0: p = p_0$ против простой $H_1: p = 4p_0$ была бы не менее заданной.

В табл. 1 приведены результаты расчетов требуемого объема выборки при различных значениях p_0 , α и $(1-\beta)$.

ПРИМЕР

Необходимо организовать вычислительный эксперимент (определить требуемый объем выборки и обосновать решающее правило при проверке гипотезы о безопасности заданных

условий бомбометания с БЛА) при уровне значимости $\alpha = 0,10$, требуемой мощности $(1-\beta) = 0,95$, если $p_0 = 0,002$.

Таблица 1

Требуемый объем выборки

p_0	$(1-\beta) = 0,90$				$(1-\beta) = 0,95$			
	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,001$
0,001	973	1331	2319	3852	1574	1939	3288	4552
0,002	487	666	1160	1926	787	970	1644	2276
0,003	325	444	773	1284	525	647	1096	1518
0,004	244	333	580	963	394	485	822	1138
0,005	195	267	464	771	315	388	658	911
0,006	163	222	387	642	263	324	548	759
0,007	139	191	332	551	225	277	470	651
0,008	122	167	290	482	197	243	411	569
0,009	109	148	258	428	175	216	366	506
0,010	98	134	232	386	158	194	329	456

Сначала определяем объем выборки n . В соответствии с заданными исходными данными по табл. 1 находим значение n :

$$n = 787.$$

Затем определяем значение параметра λ :

$$\lambda = np_0 = 787 \cdot 0,002 = 1,574.$$

Находим квантиль порядка $(1-\alpha)$ случайной величины Y , подчиняющейся закону Пуассона с параметром $\lambda = 1,574$:

$$y_{1-\alpha} = 3.$$

По формуле (6) определяем значение вероятности случайного события B : $P(B) = 0,1835$.

Тогда вычислительный эксперимент должен быть организован следующим образом. С использованием комплексной имитационной модели необходимо провести 787 реализаций и определить суммарное число реализаций y , в которых наблюдалось случайное событие «поражение БЛА осколками собственных АБ».

По результатам экспериментов делается следующий вывод:

если $y < 3$, то принимается решение о том, что рассматриваемые условия бомбометания безопасны;

если $y > 3$, то принимается решение о том, что рассматриваемые условия не являются безопасными;

если $y = 3$, то проводится розыгрыш случайного события B , вероятность которого составит $P(B) = 0,1835$. Если событие B в этом розыгрыше произошло, то принимается решение о том, что рассматриваемые условия не являются безопасными; в противном случае – условия безопасны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к организации вычислительного эксперимента с использованием комплексной имитационной модели бомбометания с БЛА. Эксперимент проводится с целью оценки опасности поражения БЛА осколками собственных АБ при бомбометании в заданных

условиях. Организация эксперимента включает обоснование требуемого объема выборки и выработки решающего правила по результатам эксперимента.

Задача оценки опасности формализована как задача проверки гипотезы о вероятности случайного события. Особенности рассматриваемой задачи являются: вероятность рассматриваемого события близка к нулю; альтернативная гипотеза – сложная.

Обосновано применение рандомизированного правила принятия решения по результатам опытов.

Предложен подход для оценки требуемого объема выборки при проведении вычислительного эксперимента, основанный на оценке мощности критерия.

Приведен пример определения требуемого объема выборки и формулировки решающего правила при проверке гипотезы о безопасности заданных условий бомбометания с БЛА при заданных значениях уровня значимости, мощности и предельно допустимой вероятности поражения БЛА осколками собственных АБ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №23-29-00244.

Список используемых источников

1. *Маслова Л. А., Скрынников А. А.* Расчет параметров траектории осколков авиационных бомб и оценка потенциальной опасности поражения ими ударных беспилотных летательных аппаратов – носителей при бомбометании с малых высот // Актуальные вопросы состояния, развития и эксплуатации авиационного вооружения : сб. науч. ст. по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции «КАЛИБР» в рамках III Всероссийского форума с международным участием «Академические Жуковские чтения» (22–24 ноября 2023 г.). – Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2023. – С. 118–123.

2. *Маслова Л. А.* Постановка задачи обоснования безопасных условий бомбометания с БПЛА // Актуальные вопросы состояния, развития и эксплуатации авиационного вооружения : сб. науч. ст. по материалам V Всероссийской научно-практической конференции «КАЛИБР» в рамках II Всероссийского форума с международным участием «Академические Жуковские чтения» (23–25 ноября 2022 г.). – Воронеж : ВУНЦ ВВС «ВВА», 2022. – С. 165–167.

3. *Мужичек С. М., Скрынников А. А., Маслова Л. А.* Концепция приемлемого риска потери ударного беспилотного летательного аппарата за счет поражения его осколками собственных бомб // Вооружение и экономика. – 2024. – № 1(67). – С. 9–17.

4. *Дорофеев А. Н., Морозов А. П., Саркисян Р. С.* Авиационные боеприпасы. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1978. – 445 с.

5. *Буравлёв А. И., Буренок В. М., Брезгин В. С.* Методы оценки эффективности вооружения и военной техники. – М. : изд-во «Граница», 2022. – 227 с.

6. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. – М. : Высш. шк., 2006. – 575 с.

7. *Горяинов В. Б., Павлов И. В., Цветкова Г. М.* Математическая статистика. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 424 с.

8. *Ивченко Г. И., Медведев Ю. И.* Математическая статистика. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 352 с.

9. *Шуленин В. П.* Математическая статистика. – Томск : Изд-во научно-технической литературы, 2012. – Т. 1. – 540 с.

И. В. Наумчик,
кандидат технических наук, доцент;
М. В. Помошник;
И. К. Прилуцкий,
доктор технических наук, профессор

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРШНЕВОЙ СТУПЕНИ С УЧЕТОМ АКУСТИЧЕСКОГО НАДДУВА

Представлены результаты исследования влияния резонансных газодинамических и термодинамических явлений во всасывающей системе ступени поршневого компрессора на технико-экономические показатели его работы: производительность, потребляемую мощность, температурные режимы и, как следствие, надежность органов газораспределения. Получены резонансные эксплуатационные характеристики ступени компрессорной станции системы 8Г311 стартового комплекса 17П32-3. По результатам численного исследования определены оптимальные длины всасывающего трубопровода, позволяющие достичь максимальной производительности компрессора в режиме резонансной интенсификации его работы. Научное решение поставленной задачи базируется на применении модернизированного пакетного продукта «КОМДЕТ-ВКА(М)». В его основе лежит математическое описание свойств реальных газов, газовых, газожидкостных и паровоздушных смесей и протекающих физических процессов на базе фундаментальных уравнений термодинамики тела переменной массы, теплообмена и массопереноса, механики и газовой динамики в сочетании с комплексом эмпирических коэффициентов и зависимостей. Эти коэффициенты и зависимости получены при испытании конструктивно разнообразных имитирующих устройств, лабораторных и натуральных образцов поршневых машин, различных по назначению, геометрическим размерам цилиндров, режимным параметрам.

Ключевые слова: поршневой компрессор, система газоснабжения, текущие рабочие процессы, интегральные параметры, резонансные колебания, всасывающий трубопровод, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Сжатые газы играют важнейшую роль в подготовке ракеты космического назначения как на техническом, так и на стартовом комплексе. Множество задач, решаемых с помощью сжатых газов, включая управление пневмогидравлическими системами, поддержание давления в топливных баках, работу систем термостатирования, обеспечение комплекса пневмоиспытаний изделия, определяет важность значения системы газоснабжения в составе наземного технологического оборудования стартового комплекса.

В процессе длительной эксплуатации снижение государственного финансирования космических программ (рис. 1) и неполнота комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) негативно влияют на техническое состояние системы газоснабжения, что приводит к снижению уровня ее готовности.

В состав компрессорной станции входит основное и вспомогательное оборудование. К основному оборудованию относится многоступенчатый поршневой компрессор, электродвигатель, газовые коммуникации. К вспомогательному – оборудование, которое предназначено для поддержания безопасной и надежной работы основных систем и элементов системы газоснабжения.

Рассмотрим схему взаимосвязи между основными и вспомогательными элементами штатной системы газоснабжения 8Г311 (рис.2,*а*) и элементами ступени поршневого компрессора (СПК) (рис.2,*б*).

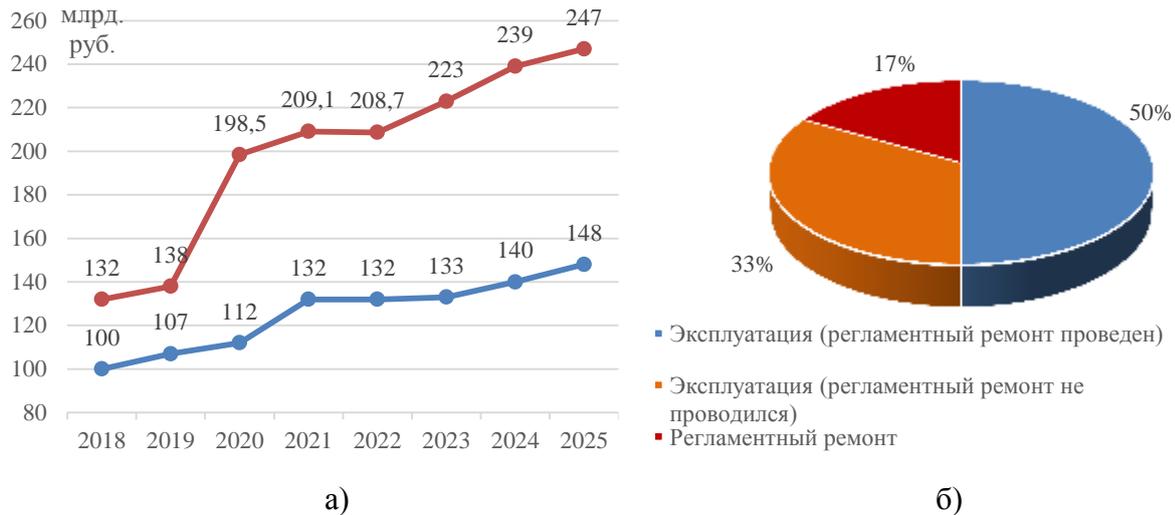


Рис. 1. Факторы, влияющие на работоспособность системы газоснабжения:
 а – планируемое и фактическое финансирование космических программ;
 б – текущее состояние системы газоснабжения (СГС)

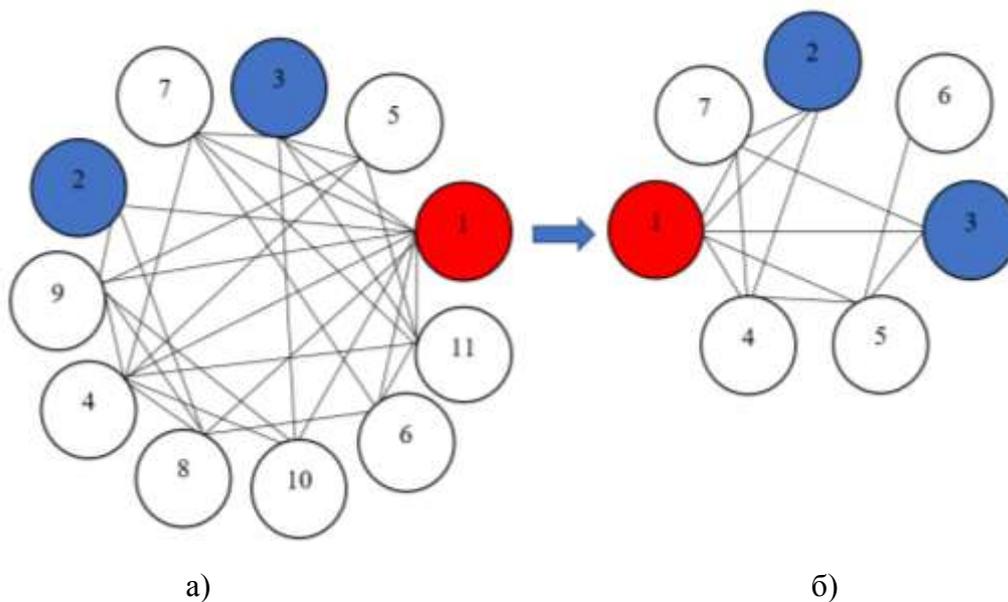


Рис. 2. Схема взаимосвязи:
 а – между основными и вспомогательными системами и элементами СГС
 (1 – ступень поршневого компрессора; 2 – электродвигатель;
 3 – газовые коммуникации; 4 – система охлаждения компрессора; 5 – система
 охлаждения газа; 6 – система смазки; 7 – блоки осушки газа; 8 – система автоматики;
 9 – система управления; 10 – система хранения (ресиверная); 11 – ЗИП);
 б – между основными и вспомогательными системами и элементами
 компрессорной ступени (1 – полость всасывания и нагнетания
 цилиндра-поршневой группы; 2 – система охлаждения СПК; 3 – органы
 газораспределения; 4 – узлы уплотнения СПК; 5 – механизм движения;
 6 – элементы уравновешивания; 7 – система смазки СПК)

Представленная схема (рис. 2,а) наглядно показывает, что поршневой компрессор занимает ключевое место в структуре системы газоснабжения, функциональным элементом которого является компрессорная ступень. Исходя из этого технико-экономические характеристики

системы газоснабжения во многом определяются конструкцией ступени поршневого компрессора, как видно из рис. 2,б. В процессе длительной эксплуатации наблюдается снижение первоначальных значений производительности и мощности поршневого компрессора, что отражается на экономичности его работы.

В последнее время активно ведутся работы по повышению технико-экономических характеристик эксплуатируемых поршневых компрессоров с кривошипно-шатунным механизмом движения (КШМД) и созданию поршневого компрессора с линейным приводом (ЛПр) за счет применения различных способов отвода тепла от сжимаемого газа [2, 3–6]. В данной статье предлагается способ повышения производительности действующих поршневых компрессоров, основанный на использовании резонансных колебаний давлений во всасывающей системе [1, 3, 8]. В предлагаемой модели используется внутреннее свойство поршневых машин создавать колебания давления газа во всасывающих и нагнетательных системах, вызываемых периодическими процессами всасывания и нагнетания.

В настоящее время резонансные волновые процессы не учитываются при разработке и производстве многоступенчатых поршневых компрессоров, что прежде всего можно объяснить отсутствием взаимосвязи между колебательными процессами, возникающими во всасывающем тракте, и термодинамическими процессами сжатия в условиях резонанса.

Численные расчеты проводятся без учета влияния колебательных процессов на динамику движения клапанов и в целом – на надежность поршневого компрессора.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ВСАСЫВАЮЩИЙ ТРУБОПРОВОД – ВСАСЫВАЮЩИЙ КЛАПАН – ЦИЛИНДР» ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА ВО ВСАСЫВАЮЩЕМ ТРУБОПРОВОДЕ

Изменение давления и температуры газа в конце процесса всасывания влияет на плотность газа в системе. Это изменение определяет количество газа, которое компрессор может компримировать за определенный период времени. Отношение массы газа, поступающего в цилиндр при наличии колебаний, к тому количеству газа, которое может поступить в условиях равномерного течения потока газа во всасывающем трубопроводе, характеризуется коэффициентом наполнения [7]. С учетом объемных потерь в ступени ПК между стандартной точкой всасывания (СТВ) и стандартной точкой нагнетания (СТН) коэффициент наполнения будет равен коэффициенту подачи:

$$\eta_v = \lambda. \quad (1)$$

В свою очередь, коэффициент подачи определяется выражением [7]

$$\lambda = \lambda_d \lambda_t \left[\lambda_o - (\Delta\lambda_{o,вс} + \Delta\lambda_{o,нг}) \right] - (v_{в,у} + v_{пр}), \quad (2)$$

- где λ_d – коэффициент давления;
 λ_t – коэффициент подогрева;
 λ_o – объемный коэффициент;
 $\Delta\lambda_{o,вс}$ – величина относительных объемных потерь, зависящая от углов запаздывания закрытия всасывающих клапанов относительно верхней и нижней мертвых точек;
 $\Delta\lambda_{o,нг}$ – величина относительных объемных потерь, зависящая от углов запаздывания закрытия нагнетательных клапанов относительно верхней и нижней мертвых точек;
 $v_{в,у}$ – относительная величина внешних утечек;

$v_{пр}$ – относительная величина внешних утечек через закрытые клапаны ступеней компрессора.

Для вывода основных уравнений, определяющих коэффициент наполнения, рассмотрим наиболее часто встречающуюся на практике схему всасывающей системы компрессора: в точке 1 производится поступление рабочего тела в компрессор из атмосферы, т. е. $p_{вс} = p_{атм}$; в точке 2 присоединен всасывающий трубопровод к цилиндру одностороннего действия поршневой ступени, объем которого периодически меняется (рис. 3).

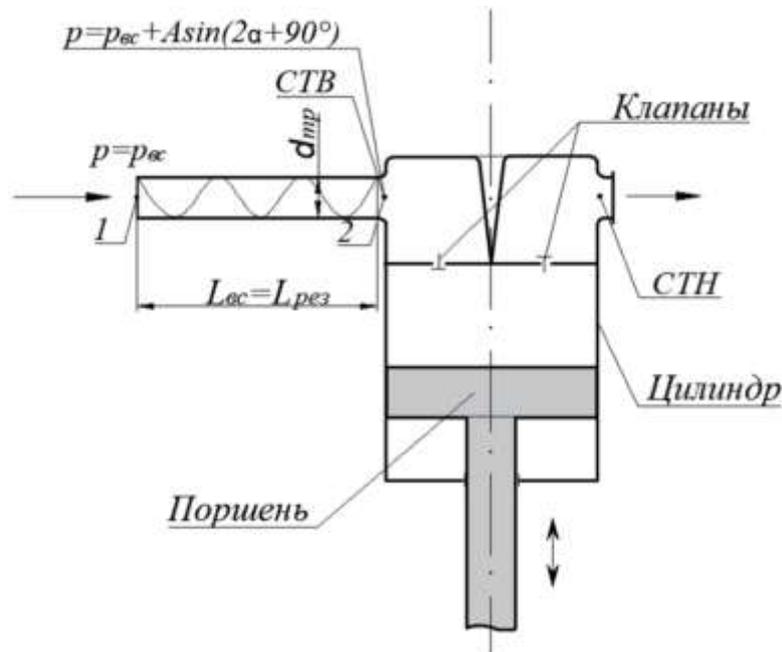


Рис. 3. Схема ступени поршневого компрессора с учетом переменной длины всасывающего трубопровода

Для расчета динамики пульсирующего потока газа в сложной газопроводной системе поршневого компрессора приняты допущения, что линейный размер цилиндра компрессора и местные сопротивления намного меньше длины волны последней учитываемой гармоники колебаний. Поэтому расчет газодинамических колебательных процессов в трубопроводной системе поршневого компрессора сводится к решению задачи неустановившегося движения газа в прямой трубе постоянного сечения с граничными условиями, связанными с рабочим процессом в цилиндре компрессора. Поскольку длина всасывающего трубопровода значительно больше диаметра, а диаметр намного меньше длины волны последней учитываемой гармонической составляющей колебания потока, движение газа можно считать одномерным.

Изменение давления при неустановившемся движении идеального газа в цилиндрической трубе постоянного сечения описывается уравнением [9]

$$p = p_{вс} + A \sin(2\alpha + 90^\circ), \quad (3)$$

где $p_{вс}$ – номинальное давление во всасывающем трубопроводе;

A – амплитуда колебаний давления;

α – угол поворота коленчатого вала.

Выражение (3) отражает синусоидальную форму колебания давления газа в трубопроводе, когда резонанс происходит по второй гармонике вынуждающих импульсов. Такая картина наблюдается для большинства компрессоров систем газоснабжения стартовых комплексов, для которых вторая гармоника является главной, преобладающей над другими гармониками [7].

Процесс колебания газа во всасывающей системе можно описать, применив уравнения гидродинамики:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{p}{p_{cp}} = \left(\frac{\rho}{\rho_{cp}} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (6)$$

где u – скорость газа;
 ρ – плотность;
 p – давление;
 p_{cp} – среднее значение давления;
 ρ_{cp} – среднее значение плотности.

Нестационарное движение газа с дозвуковой скоростью в длинных трубах описывается линеаризованной системой уравнений:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + 2\xi \rho u \\ -\frac{\partial p}{\partial t} = a_{зв}^2 \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) \\ \frac{p}{\rho^k} = \text{const} \end{cases}, \quad (7)$$

где ξ – коэффициент, зависящий от сопротивления трубы, гидравлического радиуса сечения и средней скорости газа в трубе;
 $a_{зв}$ – скорость звука;
 k – показатель адиабаты.

Вместо уравнений (4)–(6) можно применить эквивалентные волновые уравнения [6]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a_{зв}^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = a_{зв}^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}. \quad (9)$$

Составим граничные условия для трубы в точке 1 ($x = 0$) граничное условие (рис. 3)

$$p_{вс} = p_{атм}, \quad (10)$$

т. е. абсолютное давление всасывания равно атмосферному.

Пренебрегая теплообменом со стенками рабочей полости в процессе всасывания, изменение внутренней энергии газа в цилиндре для граничных условий в сечении 2–2 ($X = L$) определяется как разность энтальпии свежей порции газа и затрачиваемой работы:

$$C_v d(M_{ц} T) = C_p T_{вс} dM_{ц} - p dV, \quad (11)$$

где C_v – изохорная теплоемкость;
 C_p – изобарная теплоемкость;
 $M_{ц}$ – масса газа, поступающего в рабочую полость;
 $T_{ц}$ – температура газа в цилиндре;
 $T_{вс}$ – температура газа перед всасывающим клапаном;

- $p_{ц}$ – давление в цилиндре;
 $V_{ц}$ – переменный объем рабочей полости.

Принимая во внимание соотношение

$$M_{ц} T_{ц} = \frac{P_{ц} V_{ц}}{R}, \quad (12)$$

где R – газовая постоянная, получим

$$\frac{C_v}{R} V dp + \frac{C_p}{R} p V = C_p T_{вс} dM. \quad (13)$$

С учетом того, что $C_p/C_v = k$, $a_{зв} = \sqrt{k T_{вс} R}$ – скорость звука, уравнение (13) после деления на dt принимает вид

$$a_{зв}^2 \frac{dM}{dt} = V \frac{dp}{dt} + k p \frac{dV}{dt}. \quad (14)$$

Здесь $\frac{dM}{dt}$ – расход газа через открытый клапан, который может быть выражен через скорость около клапана и плотности газа, при этом

$$\frac{dM_{ц}}{dt} = S_{тр} \rho_0 u, \quad (15)$$

где $S_{тр}$ – площадь поперечного сечения трубопровода.

Таким образом, уравнение (11) для граничных условий при $X = L$ запишется как

$$a_{зв}^2 S_{тр} \rho_0 u = V \frac{dp}{dt} + k p \frac{dV}{dt}. \quad (16)$$

Формализуем второе граничное условие, используя уравнения (4) и (16). После ряда преобразований получим линейное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 p}{dt^2} + \left(2\xi + \frac{1+k}{V} \frac{dV}{dt} \right) \frac{dp}{dt} + \left(\frac{k}{V} \frac{d^2 V}{dt^2} + \frac{2\xi k}{V} \frac{dV}{dt} \right) p = - \frac{a_{зв}^2 S_{тр}}{V} \frac{dp}{dx} \Big|_{X=L}. \quad (17)$$

Введем переменную $dt = \frac{d\alpha}{\omega}$, где ω – угловая скорость, α – угол поворота коленчатого вала, получим основные уравнения математической модели для системы «всасывающий трубопровод – всасывающий клапан – цилиндр» поршневого компрессора:

$$\frac{d^2 p}{d\alpha^2} + A(\alpha) \frac{dp}{d\alpha} + B(\alpha) p = f(\alpha), \quad (18)$$

где

$$A(\alpha) = \frac{2\xi}{\omega} + \frac{1+k}{V} \frac{dV}{d\alpha};$$

$$B(\alpha) = \frac{k}{V} \frac{d^2 V}{d\alpha^2} + \frac{2\xi k}{\omega} \frac{dV}{d\alpha};$$

$$f(\alpha) = - \frac{a_{зв}^2 S_{тр}}{\omega^2 V} \frac{dp}{dx} \Big|_{X=L}.$$

Уравнение (18) можно рассматривать как уравнение нестационарного движения газа в цилиндре.

Математическая модель рабочих процессов в системе «всасывающий трубопровод – всасывающий клапан – цилиндр» поршневого компрессора в условиях резонансных колебаний

давления газа во всасывающей системе реализована в виде отдельной подпрограммы модернизированного пакетного продукта КОМДЕТ-ВКА (М).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ДЛИНЫ ВСАСЫВАЮЩЕГО ТРУБОПРОВОДА СТУПЕНИ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ СТАРТОВОГО КОМПЛЕКСА

Учитывая, что привод стационарного поршневого компрессора нерегулируем, получение максимального эффекта от резонансной интенсификации производительности достигается путем подбора всасывающего трубопровода определенной длины. Наибольший прирост производительности может быть получен, когда момент закрытия всасывающего клапана совпадает с моментом достижения амплитуды максимального значения.

Определим зависимость между переменным объемом рабочей полости цилиндра и колебаниями давления газа в трубопроводе, используя метод разделения переменных.

Применительно к рассматриваемой задаче частное решение уравнения (9) может быть представлено в виде произведения двух функций:

$$p(x,t) = T(t)X(x), \quad (19)$$

где $X(x)$ – собственная функция, соответствующая собственным значениям аргумента, которая определяется следующим образом:

$$X(x) = \sin \frac{\omega_0}{a_{зв}} x. \quad (20)$$

В точке 2 ($X=L$) с учетом граничных условий (17) выражение (3) будет иметь следующий вид:

$$P(L,t) = T(t) \sin \frac{\omega_0}{a_{зв}} L. \quad (21)$$

Продифференцировав формулу (3) по dx , получим

$$\frac{dP}{dX_{X=L}} = T(t) \frac{\omega_0}{a_{зв}} \cos \frac{\omega_0}{a_{зв}} L. \quad (22)$$

После преобразований получим, что

$$\frac{dP}{dX_{X=L}} = \frac{\omega_0}{a_{зв}} \operatorname{ctg} \frac{\omega_0}{a_{зв}} L p. \quad (23)$$

Учитывая уравнения (23) и (17), получим

$$\frac{d^2 p}{dt^2} + \left(2\xi + \frac{1+k}{V} \frac{dV}{dt} \right) \frac{dp}{dt} + \left(\frac{k}{V} \frac{d^2 V}{dt^2} + \frac{2\xi K}{V} \frac{dV}{dt} + \frac{a_{зв} S_{тр} \omega_0}{V} \operatorname{ctg} \frac{\omega_0}{a_{зв}} L \right) p = 0. \quad (24)$$

По аналогии с механическими колебаниями коэффициент 3-го слагаемого представляет собой квадрат собственной частоты газового столба во всасывающей системе ω_0 с учетом изменяющегося объема цилиндра:

$$\frac{k}{V} \frac{d^2 V}{dt^2} + \frac{2\xi k}{V} \frac{dV}{dt} + \frac{a_{зв} S_{тр} \omega_0}{V} \operatorname{ctg} \frac{\omega_0}{a_{зв}} L = \omega_0^2. \quad (25)$$

Используя приведенные уравнения, выполнен расчетный анализ ступени ПК посредством пакетного продукта КОМДЕТ-ВКА (М). В качестве объекта исследования выбрана I ступень поршневого компрессора ЭКСА 7,5-3М-1 системы газоснабжения 8Г311.

При определении текущих и интегральных параметров были приняты следующие условия:

1. Отсутствуют колебания давления в полости нагнетания, т. е. $V_{нг.п} \rightarrow \infty$, $p_{нг} = \text{const}$.
2. В базовом (исходном) варианте рассматриваемых ступеней $d_{вс.тр} = d_{нг.тр}$.
3. В ступени с наддувом: $p_{п.вс} = f(\varphi)$ при $L_{вс.тр} \neq \text{const}$ и $d_{вс.тр} = d_{нг.тр}$.

Результаты численного исследования текущих и интегральных параметров ступени поршневого компрессора представлены в табл. 1 и на рис. 4–6.

Таблица 1

Параметры I ступени компрессора ЭКСА 7,5-3М-1 при переменной длине всасывающего трубопровода

Параметр	Размерность	Длина всасывающего трубопровода $L_{тр}$, мм					
		0	700	800	1000	1600	1700
$d_{тр}$	мм	60					
$D_{ц}$		155					
$S_{п}$		100					
n	об/мин	990					
$p_{вс}$	МПа	0,10					
$p_{нг}$		0,36					
$T_{вс}$	К	293					
a	-	0,08					
Параметр	Размерность	Длина всасывающего трубопровода $L_{тр}$, мм					
		0	700	800	1000	1600	1700
m	кг/час	103,2	111,1 ^(↑7,7%)	107,5	105,52	122,0 ^(↑18,4%)	117,8
V	м ³ /мин	1,427	1,52	1,48	1,45	1,687	1,631
λ_T		0,9303	0,9279	0,9421	0,93	0,916	0,91
λ_o		0,8710	0,88	0,87	0,86	0,89	0,88
$\Delta\lambda_{о.вс}$		0,0092	0,0083	0,0116	0,0479	0,0032	0,0035
$\Delta\lambda_{о.нг}$		0,0081	0,0079	0,0084	0,0084	0,0078	0,0066
$\sum\chi_{вс}$		0,043	0,0032	0,0031	0,0032	0,0035	0,0076
$T_{стн}$		К	451,8	446,35	444,18	452,35	449,1
$T_{ц}$	465,5		459,5	457,85	465,5	435,4	453,5
$W_c^{вс}$	м/с	0,68	0,932	0,857	0,688	0,992	0,847
$W_c^{нг}$		0,94	0,947	0,959	0,935	0,966	0,952
$N_{инд}$	кВт	4,631	4,57	4,48	4,49	4,96	4,49
$\eta_{из.инд}$	-	0,881	0,878	0,878	0,876	0,883	0,881

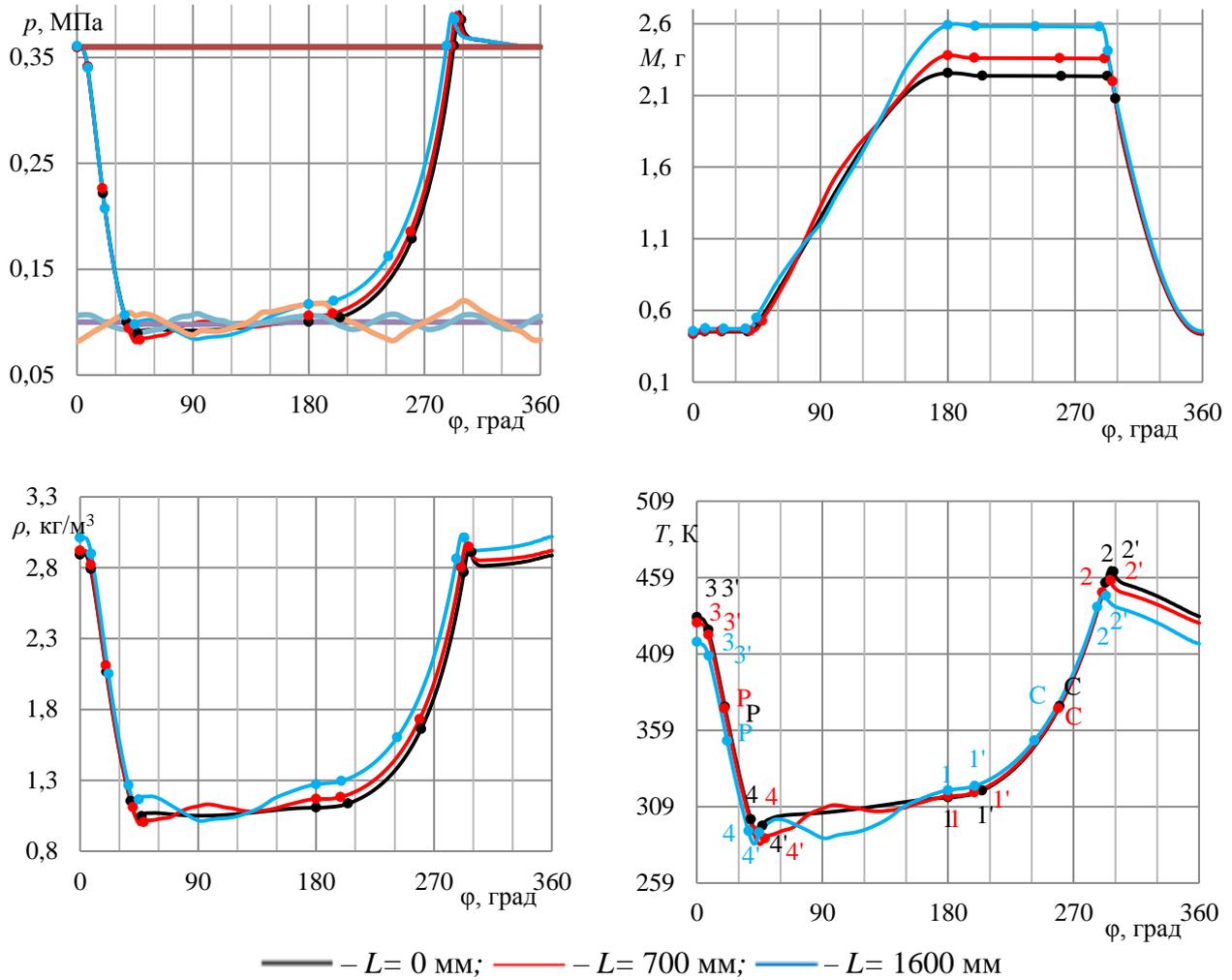


Рис. 4. Основные текущие параметры I ступени компрессора ЭКСА 7,5-3М-1

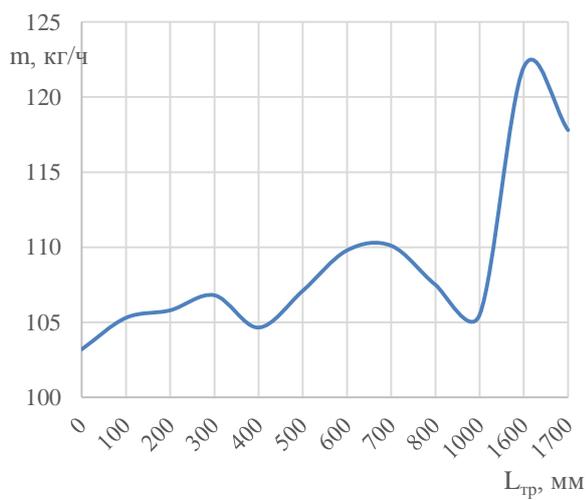


Рис. 5. Производительность I ступени компрессора ЭКСА 7,5-3М-1

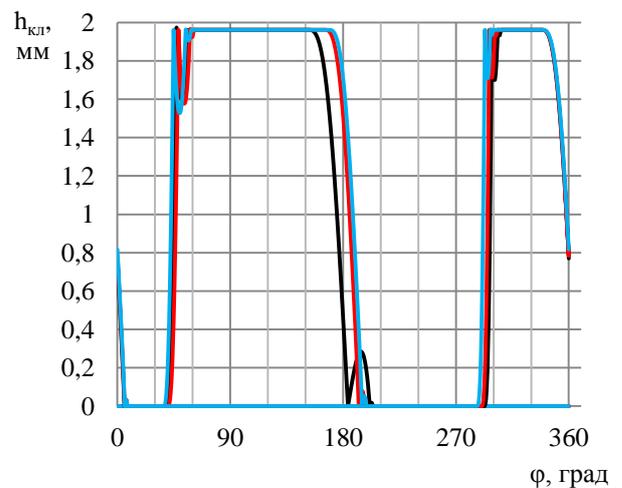


Рис. 6. Динамика движения клапанов I ступени компрессора ЭКСА 7,5-3М-1

При анализе колебательных процессов рассмотрен базовый (штатный) вариант ступени компрессора ($L = 0$) и варианты ступеней с переменной длиной всасывающего трубопровода ($0 \leq L_{\text{вс.тр}} \leq 1700$ мм) при постоянной частоте вращения коленчатого вала и с постоянным значением диаметра трубопровода ($d_{\text{тр}} = 60$ мм).

Изменяющаяся длина всасывающего трубопровода, как следует из анализа рис. 4, влияет на интенсивность колебаний потока газа. При длине трубопровода $L_{\text{вс.тр}} = 700$ мм и $L_{\text{вс.тр}} = 1600$ мм в газовой полости возникает повышение давления, которое приводит к росту массы всасываемого газа на 7,7 и 18,4%, что повышает производительность компрессора и индикаторную мощность. Увеличение длины трубопровода на величину 1600 мм приводит к понижению производительности (см. рис. 5). Эффект повышения производительности будет зависеть не только от амплитуды колебания, но также от фазы наступления максимального давления в трубопроводе по отношению к мертвой точке положения поршня, когда происходит полное закрытие всасывающих клапанов, а также сопротивления самих клапанов. Здесь следует указать, что для резонирующих длин ступени поршневого компрессора не наблюдается нарушений в динамике движения пластин клапанов (см. рис. 6) и малых скоростях соударений пластин о седло $W_c^{\text{вс/нт}} \leq 1$ м/с, что говорит о надежности органов газораспределения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя изложенное выше, можно сделать вывод, что акустический наддув поршневого компрессора в I ступени является эффективным способом повышения производительности до 18,4% при $L_{\text{вс.тр}} = 1600$ мм и до 7,7% при $L_{\text{вс.тр}} = 700$ мм. Более того, такое повышение производительности достигается без капитальных и эксплуатационных затрат за счет совершенствования конструкции всасывающей линии.

Положительное влияние резонансных колебаний давления на производительность поршневого компрессора способствует уменьшению продолжительности работы компрессорной станции, что позволяет обеспечить выдачу требуемого количества газа потребителю в сжатые сроки и повысить готовность стартового комплекса к запускам космических аппаратов военного и двойного назначения.

Список используемых источников

1. Бусаров С. С. Экспериментальные исследования пульсаций давления в газовых коммуникациях малорасходных поршневых тихоходных компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. – 2022. – № 3. – С. 24–27.
2. Анализ рабочих процессов и оценка уровня механического КПД поршневых компрессоров с линейным приводом для систем газоснабжения и жизнеобеспечения объектов вооружения / И. В. Ворошилов [и др.] // Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского. – 2019. – Вып. 671. – С. 259–279.
3. Кузьмин А. А., Романов Н. Н. О влиянии волновых явлений в магистралях на работу поршневых компрессоров // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2019. – Вып. 1(29). – С. 31–36.
4. Пат. 2734088 РФ. Ступень поршневого компрессора с жидкостным охлаждением / Пеньков М. М., Казимиров А. В., Молостов А. В., Прилуцкий И. К., Ведерников М. В., Молодова Ю. И., Горбушин А. Л.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А. Ф. Можайского. – № 2019140737; заявл. 09.12.2019; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29. – 9 с.

5. Пат. 2812878 РФ. Ступень поршневого компрессора / Наумчик И. В., Молостов А. В., Прилуцкий И. К., Ведерников М. В., Молодова Ю. И.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А. Ф. Можайского. – № 2022120907; заявл. 05.07.2022; опубл. 05.02.2024, Бюл. № 4. – 10 с.

6. Пат. 2817323 РФ. Ступень поршневого компрессора / Помощник М. В., Прилуцкий И. К., Казимиров А. В., Ведерников М. В., Молодова Ю. И.; заявитель и патентообладатель ВКА им. А. Ф. Можайского. – № 2023114677; заявл. 02.06.2023; опубл. 15.04.2024, Бюл. № 11. – 10 с.

7. *Пластинин П. И.* Поршневые компрессоры : учеб. пособие. – 3-е изд., доп. – М. : Колос С, 2006. – Т. 1 : Теория и расчет. – 456 с.

8. *Рутковский Ю. А., Рутковский А. Ю.* Повышение производительности и экономичности поршневых компрессоров акустико-резонансным наддувом // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – 2020. – Т. 3. – С. 120–124.

9. *Чарный И. Н.* Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М. : Недра, 1975. – 296 с.

А. Б. Менисов,
кандидат технических наук;
В. В. Чернышов

ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Технологии искусственного интеллекта обеспечили растущую производительность анализа данных в спорт-индустрии. Стоит отметить важность и потенциальное применение технического зрения при оценивании выполнения упражнений физической подготовки. В статье описан подход на основе искусственных нейронных сетей для обработки ключевых точек поз спортсменов во время физических упражнений. Также авторы представили результаты экспериментальных исследований с различными типами архитектур нейронных сетей.

Ключевые слова: физическая подготовка, нейронная сеть, оценивание позы человека.

ВВЕДЕНИЕ

Техническое зрение – одно из самых распространенных направлений в области искусственного интеллекта. Этому способствовал экспоненциальный рост видеоданных в различных информационных системах [1]. Достижения в нейросетевых моделях и методах обработки видеоданных привели к расширению перечня прикладных задач и определению новых исследовательских задач в различных областях [2]. Спортивная индустрия стала одной из основных областей, где применяются искусственные нейронные сети (ИНС) [3]. ИНС используются в таких направлениях, как анализ действий игроков на спортивной площадке [4], определение качества выполнения физических упражнений [5], а также прогнозирование травматизма [6].

Одним из базовых направлений применения ИНС для всех направлений физической подготовки является оценивание позы человека, которое распознает расположение суставов тела и их пространственные взаимоотношения. Оценивание позы человека направлено на классификацию и обнаружение конкретных действий человека для автоматического подсчета качественных повторений, учитывая технику и скорость движения. Исследования по оцениванию позы тела в спорте развиваются очень быстро. При этом некоторые исследования сосредоточены на конкретных видах спорта, таких как футбол [7] и бадминтон [8], другие – концентрируются на конкретных задачах в области технического зрения, например, на задаче распознавания действий на видео [9] или задаче отслеживания мяча [10].

Оценивание выполнения упражнений физической подготовки является более сложной задачей по сравнению с другими областями технического зрения, такими как классификация и сегментация изображений, а также обнаружение объектов улучшения изображения. Основная цель оценивания выполнения упражнений физической подготовки состоит в том, чтобы определить изменение позы человека на основании движения ключевых точек на видео. Количество ключевых точек определяется видом выполненных упражнений, видом и расположением сенсоров (камер), а также архитектурой ИНС.

Применение ИНС для оценивания выполнения упражнений физической подготовки возможно для разных архитектур – от сверточных до трансформеров [11]. Современные методы оценивания позы человека можно разделить на восходящие и нисходящие подходы [12], в зависимости от того, как они работают. Восходящие подходы сначала обнаруживают отдельные контрольные точки, а затем группируют их. С другой стороны, нисходящие подходы сначала обнаруживают объекты (людей), а затем анализируют расположение ключевых точек внутри каждого района изображения.



Рис. 1. Пример оценивания позы человека по ключевым точкам

ОПИСАНИЕ ПОДХОДА ОЦЕНИВАНИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ НА ОСНОВЕ ИНС

Разработанный подход состоит из трех основных этапов (рис. 2):

- идентификации и отслеживания поз спортсмена;
- распознавания вида физического упражнения;
- подсчета и указания правильных повторений.



Рис. 2. Схема подхода оценивания выполнения упражнений физической подготовки на основе ИНС

Этап 1. Идентификация и отслеживание поз спортсмена, попавшего в кадр, происходит с помощью извлечения ключевых точек и измерения углов и расстояний между ними в последующих кадрах видео. Для этого составляются вектор координат всех k -суставов в абсолютных координатах изображения и вектор углов между ключевыми точками:

$$X = \begin{pmatrix} (x_1, y_1), \angle_1 \\ \dots \\ (x_k, y_k), \angle_k \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Этап 2. Для распознавания вида физических упражнений используются ключевые точки позы человека, извлеченные на предыдущем этапе. Для этого этапа используются ИНС, которая классифицирует признаки (ключевые точки) на видео по виду физического упражне-

ния $f: X \rightarrow Y$, где $Y = \{1, \dots, M\}$ – количество видов физических упражнений. После прохождения 24 кадров определяется наиболее частый класс типа упражнения:

$$y^* = \operatorname{argmax} (f(X_1), \dots, f(X_{24})), \quad (2)$$

где $f(X_1)$ – предсказанный вид упражнения в кадре.

Этап 3. На этом этапе осуществляются подсчет и определение повторений. После определения вида физического упражнения используется диапазон движения контрольных точек, т. е. нижней и верхней границы для последующей обработки. На рис. 3 представлены два повторения (АБ и ВГ). Если ключевая точка пройдет нижнюю границу диапазона движения (точку Б), это будет засчитано как одно повторение. Если следующие значения пересекут верхнюю границу (точку В) и продолжат проходить противоположную сторону диапазона движения (точка Г), это будет считаться правильным повторением, а в противном случае это будет засчитано как невыполненное повторение (выброс или задержка).

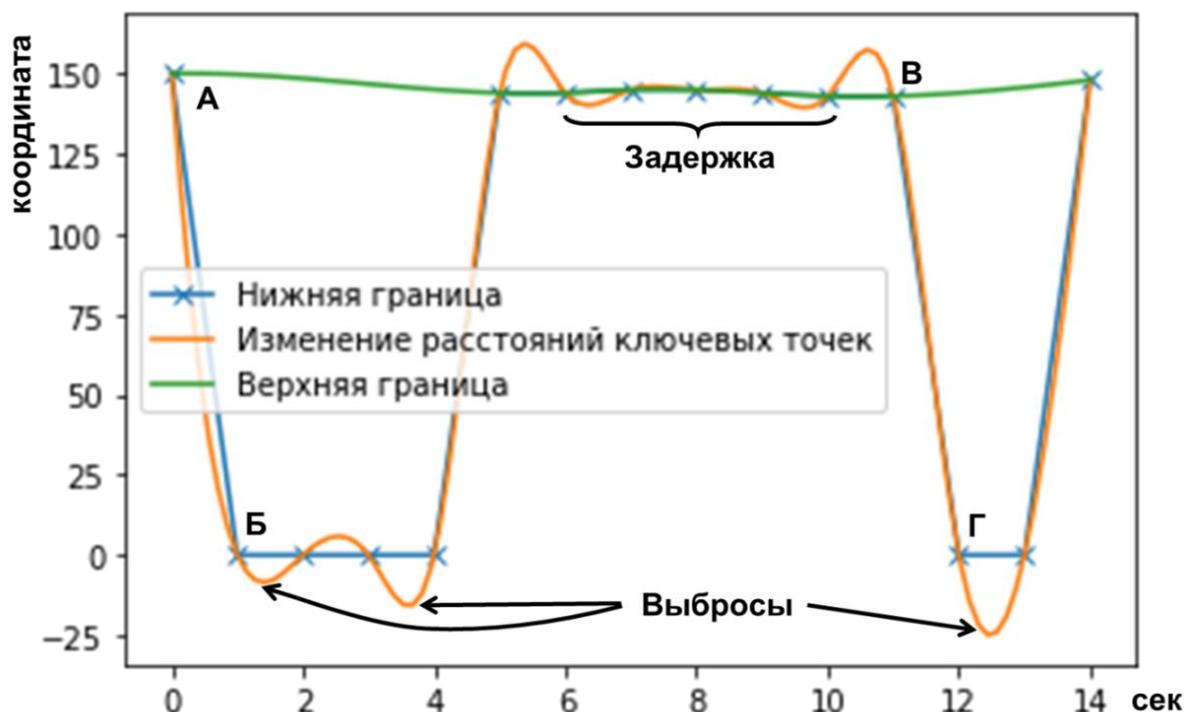


Рис. 3. Изменение расстояний ключевых точек

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Одним из основных аспектов экспериментального исследования является возможность использования разработанного подхода в режиме реального времени. Основной задачей было достижение более высокого значения частоты кадров (FPS) с использованием доступного компьютерного оборудования.

Для разработки ИНС использовались фреймворк глубокого обучения Pytorch 1.10.0, операционная среда Astra Linux 1.6 и язык программирования Python 3.8.1.

При исследовании была определена вариативность архитектур ИНС, представленная на рис. 4, а качество распознавания вида физических упражнений приведено в табл. 1.

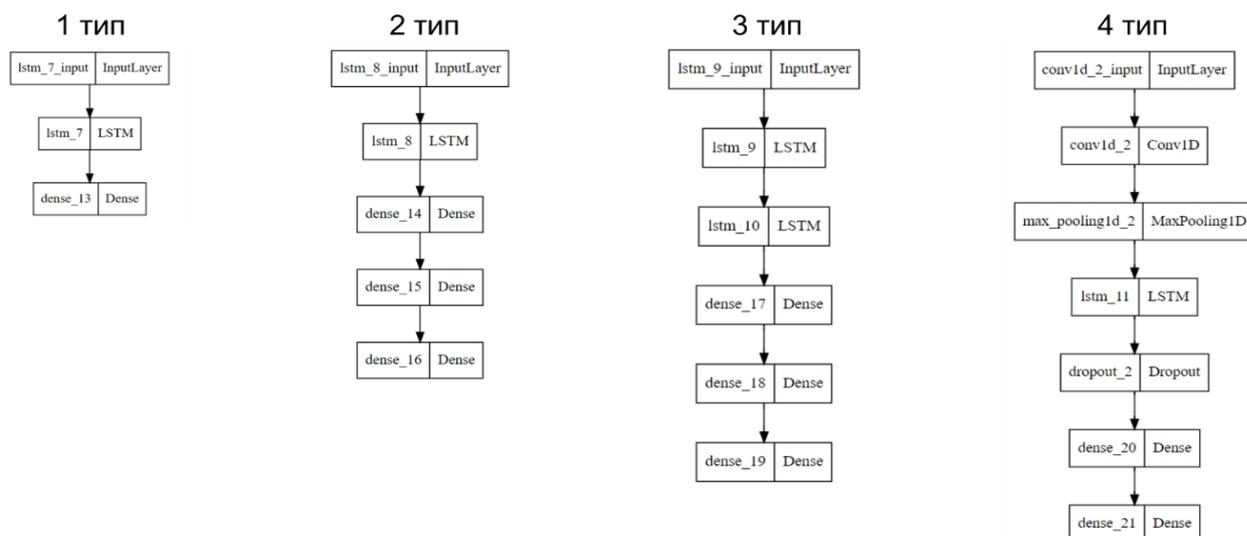


Рис. 4. Типы архитектур ИНС

Таблица 1

Качество распознавания вида физических упражнений (100 эпох)

Рейтинг	Архитектура ИНС	Точность	Полнота	AUC
III	1-й тип	0,923	0,666	0,961
II	2-й тип	0,629	0,944	0,936
I	3-й тип	1,0	0,722	0,980
IV	4-й тип	0,923	0,666	0,920

Разработанный подход был апробирован с использованием заранее записанного видео (рис. 5) и показал точную оценку выполнения физического упражнения (подтягивания).

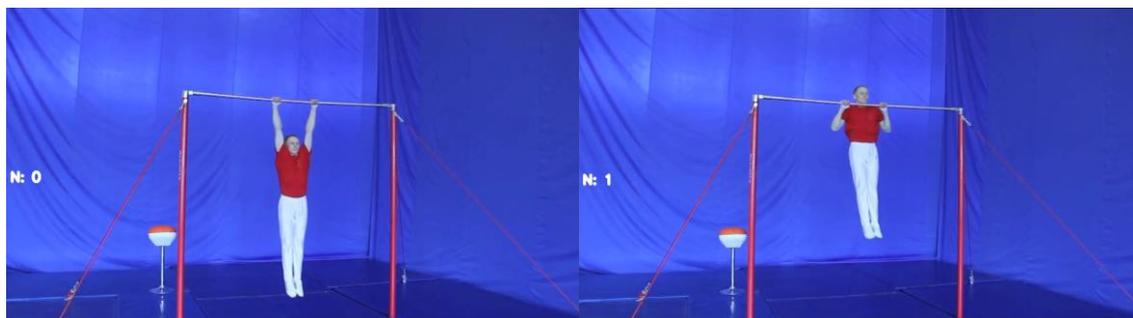


Рис. 5. Скриншот видео с оценкой выполнения физического упражнения (подтягивания)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение технологий искусственного интеллекта в спортивной сфере заключается в поиске более практичных решений путем постоянного совершенствования и расширения возможностей ИНС визуального анализа технического зрения. Разработанный подход на основе ИНС предназначен для извлечения особенностей позы человека при выполнении физического упражнения, определения типа и качества упражнения.

Направлениями будущих исследований являются проблемы сбора данных и адаптации ИНС для обработки особых спортивных поз, таких как падения и перевороты, а также при-

менения новых архитектур, которые потенциально могут быть лучше адаптированы к процессам определения ключевых точек и оценивания позы в целом.

Список используемых источников

1. Сырямкин В. И., Титов В. С. Адаптивные и интеллектуальные системы технического зрения: охрана, диагностика, навигация, робототехника, мехатроника // Интеллектуальные системы : сб. материалов IV международного форума. – Томск, 2022. – С. 13–14.
2. Кравцова Е. Ю., Сапрыкин Д. А. Компьютерное зрение на основе существующих технологий искусственного интеллекта // Инновации. Наука. Образование. – 2022. – № 49. – С. 1049–1055.
3. Егорова Н. М. Цифровизация российского спорта: проблемы и перспективы // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2022. – № 4 (136). – С. 102–106.
4. Xu H. Coordinated distribution of stadium electric load unloading based on artificial intelligence // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 10594–10603.
5. Automated Posture Analysis for the Assessment of Sports Exercises / A. Pardos [et al.] // Proceedings of the 12th Hellenic Conference on Artificial Intelligence. – 2022. – P. 1–9.
6. Artificial intelligence in sports medicine: could GPT-4 make human doctors obsolete? / K.Cheng [et al.] // Annals of Biomedical Engineering. – 2023. – P. 1–5.
7. Qiao J. The application of artificial intelligence in football risk prediction // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2022. – Vol. 2022. – С. 6996134.
8. Designing a training assistant system for badminton using artificial intelligence / Y. Zhang [et al.] // Soft Computing. – 2023. – P. 1–12.
9. YanRu L. An artificial intelligence and machine vision based evaluation of physical education teaching // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. – 2021. – Vol. 40, № 2. – P. 3559–3569.
10. Kamble P. R., Keskar A. G., Bhurchandi K. M. A deep learning ball tracking system in soccer videos // Opto-Electronics Review. – 2019. – Vol. 27, № 1. – P. 58–69.
11. Fialho G., Manhães A., Teixeira J.P. Predicting sports results with artificial intelligence—a proposal framework for soccer games // Procedia Computer Science. – 2019. – Vol. 164. – P. 131–136.
12. Vision-based robotic grasping from object localization, object pose estimation to grasp estimation for parallel grippers: a review / G. Du [et al.] // Artificial Intelligence Review. – 2021. – Vol. 54, № 3. – С. 1677–1734.

А. Н. Печников¹,

доктор технических наук,

доктор педагогических наук, профессор;

А. Н. Шиков²,

кандидат технических наук, доцент

¹ВАС имени С. М. Буденного, г. Санкт-Петербург.

²ВМПИ ВУНЦ ВМФ «ВМА имени Н. Г. Кузнецова», г. Санкт-Петербург.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОЦЕССЕ АДАПТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА

Представлены исследования применения искусственного интеллекта в процессе адаптивного обучения и подготовки специалистов ВМФ. Обосновываются важность и актуальность внедрения адаптивного обучения и повышения квалификации специалистов, прежде всего – контрактной службы. Сформулированы основные направления развития адаптивных технологий обучения в аспектах: автоматизации тестирования и проверки работ, персонализации и формирования индивидуальных траекторий обучения, использования учебной аналитики для улучшения образовательной стратегии и планирования учебного процесса, оптимизации расписания занятий и повышения эффективности всего процесса обучения и подготовки специалистов Военно-морского флота (ВМФ).

Ключевые слова: адаптивное обучение, адаптивное тестирование, индивидуальная траектория обучения, искусственный интеллект, машинное обучение, подготовка специалистов ВМФ.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение искусственного интеллекта и адаптивного обучения в процесс подготовки специалистов ВМФ открывает новые перспективы и возможности совершенствования всего военного образования. Адаптивное обучение стало одним из трендов современного образования и принято за основу во многих странах мира, но сложность и высокая технологическая стоимость сдерживают внедрение этих технологий.

Адаптивный подход к обучению предложен в пятидесятых годах прошлого столетия Б. Скиннером, который считал неотъемлемыми условиями успешного обучения адаптацию всего процесса обучения и учет индивидуальных особенностей каждого обучающегося. В этой связи возникает необходимость анализа и учета предпочтений в процессе персонализированной подготовки специалистов ВМФ, а также формирования индивидуального плана обучения. Это становится особо актуальным в настоящее время, в условиях проведения специальной военной операции и наличия большого числа специалистов, проходящих службу по контракту, и высокой степени ротации штатных специалистов кораблей и частей ВМФ, подготовка и обучение которых должны проходить в сжатое время и только по формированию компетенций, необходимых для исполнения своих служебных и функциональных обязанностей.

«Организация воинской службы преимущественно на контрактной основе принципиально изменила общий уровень подготовки военнослужащих. Военнослужащие контрактной службы – это профессионалы, которые полностью соответствуют занимаемой должности и способны в полном объеме и с высоким качеством выполнять свои функциональные обязанности» [1]. В этом случае необходим учет компетенций, которыми уже обладает каждый специалист, и организация процесса обучения по формированию недостающих компетенций по индивидуальным траекториям обучения.

Такие образовательные технологии позволяют реализовывать более эффективные и индивидуализированные планы подготовки, способствуя сокращению сроков обучения и повышению качества знаний и навыков специалистов ВМФ. «Адаптивное обучение вызывает

много споров и сомнений в давно сложившейся системе преподавания, поэтому далеко не все образовательные учреждения используют данный метод» [2]. Несмотря на явные преимущества, связанные с высокой эффективностью и результативностью адаптивного обучения, применения искусственного интеллекта и цифровых образовательных данных, требуется серьезная профессиональная подготовка учебного контента и тестовых материалов, наличие современной системы электронного обучения. «Личностные качества каждого индивидуальны, а соответственно, и степень усвоения материала разная. Создание и применение интеллектуальной адаптивной платформы позволят решить проблемы, связанные с индивидуализацией процесса образования» [3].

Платформ адаптивного обучения с каждым годом становится все больше. В основном это разработки западных стран и университетов. Особый интерес вызывают отечественные платформы, которые по предварительным данным не уступают зарубежным аналогам. «Создатели отечественной программы утверждают, что ИИ дает более объективную оценку качества учебного процесса и успеваемости студента» [4].

Основными направлениями развития адаптивных технологий обучения, в аспекте применения искусственного интеллекта, стали задачи сбора учебной аналитики, цифрового следа и оптимизация процесса обучения; автоматизации тестирования и проверки работ обучающихся; персонализированный подход к обучению и формирование индивидуальных образовательных траекторий, а также оптимизация учебного расписания. К сожалению, в военном образовании платформы адаптивного обучения практически не используются и носят инициативный локальный характер в порядке экспериментального тестирования.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ И ПРОВЕРКИ РАБОТ

Одним из главных преимуществ применения искусственного интеллекта для автоматизации адаптивного тестирования и оценки работ является сокращение количества времени, которое преподаватель тратит на проверку. Более того, на сегодняшний день существуют различные инструменты, которые позволяют автоматизировать не только процесс проверки, но и процесс формирования заданий и тестовых вопросов различного уровня сложности. В частности, Nur Fitriа в своем исследовании [5] упоминают о платформе *Kejarcita* [6], с помощью которой преподаватель может сгенерировать тестовые задания, выбрав необходимые для этого параметры, такие как предмет, тема, количество вопросов, сложность, уровень знаний студентов и пр. Затем с помощью алгоритмов машинного обучения формируются индивидуальные задания, которые после прохождения автоматически проверяются, а результаты их выполнения отправляются преподавателю.

Искусственный интеллект активно применяется для распознавания рукописного текста и дальнейшей его обработки в системах электронного обучения с большим числом обучающихся. Для решения данного типа задач зачастую используются модели, включающие в себя свёрточные и рекуррентные нейронные сети. Например, в модели CAS (*Convolve, Attend and Spell*) [3] в части энкодера для выделения визуальных признаков используется предобученная свёрточная нейросеть VGG-19-BN, а для обработки последовательной информации – двунаправленная модель управляемых рекуррентных блоков GRU (рис. 1).

У искусственного интеллекта есть и другое применение в области автоматизации проверки работ и адаптивного тестирования, в котором на данный момент он многократно превосходит ручные проверки, – выявление плагиата. Специальные программы для проверки текстов выполняют эту задачу точнее и, что важно, в разы быстрее человека. Стоит отметить, что одной из распространенных проблем становится применение нейронных сетей и больших языковых моделей (LLM), таких как *ChatGPT*.

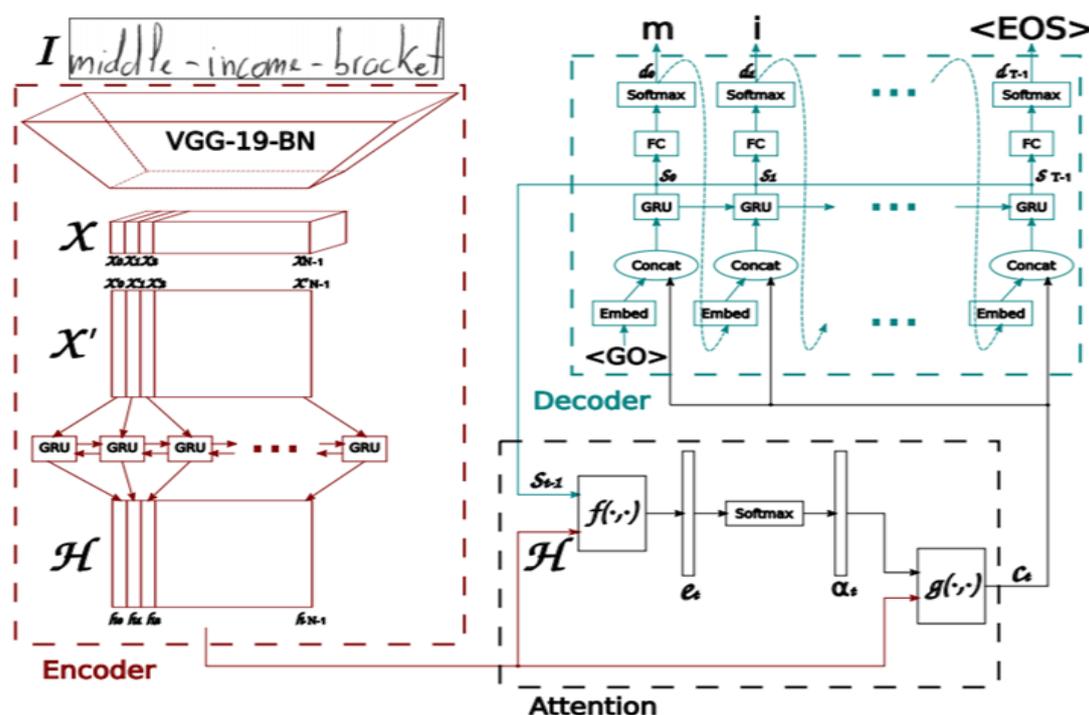


Рис. 1. Архитектура модели CAS [6]

Многие сервисы используют комплексные модели, состоящие из нескольких составных частей, включающих в себя как модели для анализа текста, так и LLM и алгоритмы глубокого обучения, и тренируются на массивных объемах данных. Тестирование с применением технологий искусственного интеллекта востребовано в организациях с большим числом обучающихся.

ПЕРСОНАЛИЗАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ ОБУЧЕНИЯ

Для обеспечения более эффективного обучения в образовательном процессе возможно использовать рекомендательные системы, которые позволят подбирать наиболее подходящий контент для обучения в зависимости от предпочтений, интереса и успеваемости специалистов ВМФ. Одним из часто используемых методов формирования рекомендаций является коллаборативная фильтрация. Данный метод использует оценку тех или иных предметов группой людей для прогнозирования оценки человека, входящего в эту группу. Для реализации данного метода могут применяться как классические алгоритмы машинного обучения (метод К ближайших соседей, байесовские сети, метод К-средних), так и более комплексные модели глубокого обучения.

Другим аспектом в персонализации обучения с помощью *искусственного интеллекта* является моделирование виртуального помощника. Разработка чат-ботов, дающих персональную обратную связь, позволяет улучшить качество усвоения материала благодаря интерактивности взаимодействия в формате диалога. Одним из самых ярких примеров использования таких чат-ботов является приложение для изучения иностранных языков. Благодаря внедрению в приложение большой языковой модели GPT-4, у обучающихся появилась возможность получать наиболее детальные комментарии по поводу применения правил и исправления допущенных ошибок и возможность задавать уточняющие вопросы и получать подробные ответы по интересующим их темам.

Однако персонализация обучения и применение индивидуальных траекторий обучения могут проявляться и в предоставлении учебного материала, исходя из индивидуальных особенностей и предпочтений специалистов ВМФ.

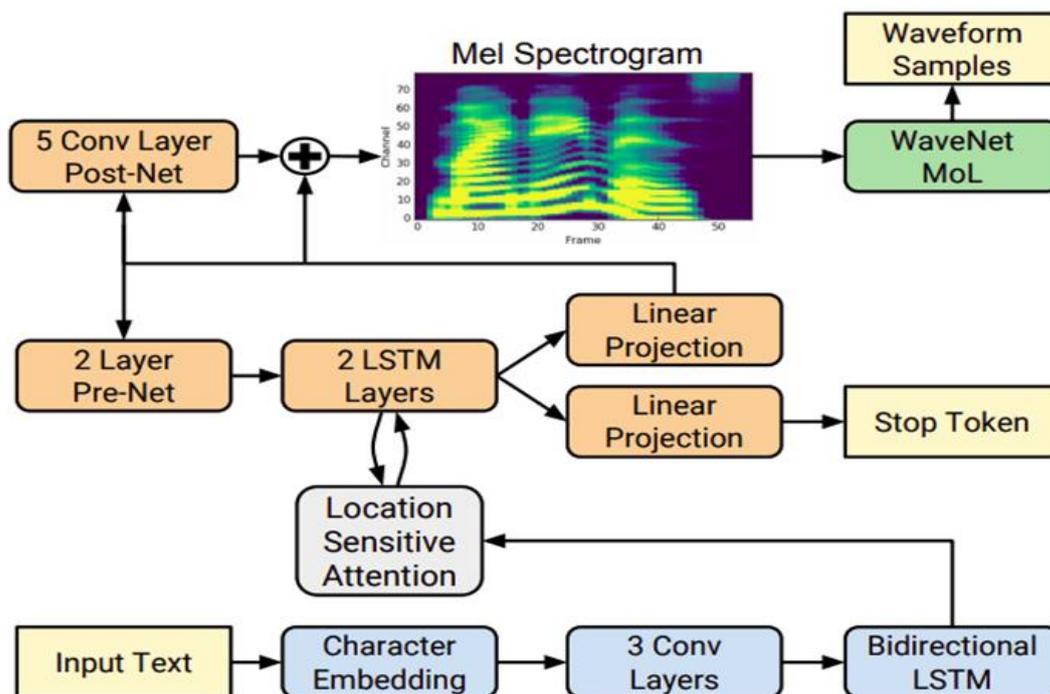


Рис. 2. Архитектура модели Tacotron2 [7]

Так, одним из важных направлений при персонализации обучения является адаптация образовательного контента для обучающихся с дислексией. В данном направлении искусственный интеллект широко применяется для генерации речи в так называемых text-to-speech моделях, позволяющих преобразовывать тестовую информацию в аудиоинформацию. Данные модели чаще всего включают в себя свёрточные нейронные сети для выделения признаков из векторных представлений слов и формирования мел-спектрограмм (для их дальнейшего преобразования в аудио) и рекуррентные нейронные сети. В качестве примера можно рассмотреть text-to-speech модель Tacotron2 [7] (рис. 2).

УЧЕБНАЯ АНАЛИТИКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБУЧЕНИЯ

Искусственный интеллект активно применяется для анализа успеваемости обучающихся, благодаря чему появляется возможность персонализации всего процесса адаптивного обучения. Большинство научных исследований, связанных с применением технологий искусственного интеллекта при оценке успеваемости, связаны с прогнозированием результатов обучения и рекомендаций по адаптации процесса и технологий обучения, формированием индивидуальных траекторий обучения. Это направление крайне востребовано в военных учебных заведениях, но сдерживается закрытостью отдельных дисциплин и направлений подготовки. Исследований, посвященных анализу цифрового следа в процессе обучения и подготовки специалистов, достаточно много. Получаемые данные важны и для преподавателей, и для организаторов обучения, и для обучающихся. Они позволяют учитывать все аспекты процесса обучения и вносить соответствующие коррективы для обеспечения высокой эффективности учебного процесса, повышения мотивации обучающихся специалистов,

а в отдельных случаях – и для сокращения сроков подготовки, что является важнейшим фактором, особенно в условиях СВО.

Во многих исследованиях и публикациях большое внимание уделяется проблемам прогнозирования результатов обучения, где решается задача бинарной классификации, целью которой является предсказать, будет ли своевременно завершен процесс обучения через некоторое время, с помощью анализа различных признаков:

Персональная информация:

- Пол.
- Возраст.
- Должность.
- Предыдущее образование.
- И другое.

Информация об успеваемости:

- Оценки и зачеты.
- Посещаемость.
- Прогресс по освоению программы обучения.
- Историческая информация об успеваемости.
- И другое.

Во многих исследованиях подтверждается гипотеза о том, что искусственный интеллект очень хорошо решает эти задачи, а зачастую даже превосходит традиционные методы по метрикам. Данный факт свидетельствует об относительной простоте задачи, что позволяет перейти к исследованию более сложной «обратной задачи» – составлению портрета студента, который имеет риск отчисления.

Имея возможность прогнозировать проблемы, связанные с обучением специалистов ВМФ, с помощью технологий искусственного интеллекта и машинного обучения, важно максимально адаптировать весь процесс обучения и подготовки под каждого обучающегося, что позволит добиться наилучшего результата. В этом случае преподаватель может не только откорректировать образовательный план или изменить подход к обучению в отношении конкретной группы специалистов, но и спрогнозировать эффект, который возымеет данное действие. Такие методы возможно применять не только в случае неуспеваемости, но и в случае потери интереса к обучению или необходимости провести обучение в сжатые сроки. Тогда у преподавателя будет возможность в той или иной мере «измерять» заинтересованность аудитории и отдельных специалистов, стимулировать активность и мотивацию к обучению за счет индивидуального подхода и интерактивных форм обучения.

ОПТИМИЗАЦИЯ УЧЕБНОГО РАСПИСАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ

Искусственный интеллект активно применяется для составления расписаний и оптимизации распределения ресурсов, времени и персонала. Искусственный интеллект позволяет учитывать множество ограничений и переменных, таких как предпочтения специалистов, проходящих обучение и подготовку, доступность ресурсов, сроки выполнения задач и другие важные факторы. Для решения подобного рода задач довольно часто используются генетические алгоритмы, а также гибридные методы, сочетающие как методы эволюционных вычислений, так и методы машинного обучения.

Данную задачу можно решать по-разному в зависимости от количества входных данных, которые необходимо обработать. Так, например, можно оптимизировать расписание с помощью решения задачи категории «job-shop scheduling problem (JSSP)», где в качестве «машины» выступает преподаватель, а в качестве «требования» – группа обучающихся, для которой преподаватель должен провести занятие, длящегося определенное время.

Для решения данной задачи можно использовать гибридную модель, совмещающую генетические алгоритмы и нейронные сети. Стоит отметить, что для решения задач с небольшим количеством переменных достаточно использовать только генетический алгоритм, однако иногда возникают ситуации, когда требуется принять во внимание и большее количество показателей, например:

- Время.
- Аудитория.
- Руководитель обучения (преподаватель).
- Группа.
- Размер группы.
- Количество ресурсов (например, компьютеры).
- И другое.

В этом случае использование алгоритмов машинного обучения становится более предпочтительным ввиду их эффективности при работе с объемными данными с большим количеством параметров. Нельзя не отметить одну из перспективных областей для исследования в области применения искусственного интеллекта для составления расписания – анализ влияния расписания на успеваемость. Например, в публикации [8] предлагается оригинальная модель для решения задачи составления расписания для преподавателей, обучающихся, предметов с учетом ограничений по их числу в день, перерывов на обед и интервалов недоступности. Решение задачи прогнозирования успеваемости в зависимости от расписания может позволить повысить эффективность образовательного процесса с помощью внесенных необходимых коррекций в учебное расписание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Адаптивные системы, несмотря на большие перспективы, в настоящее время внедряются крайне медленно вследствие высокой стоимости и сложности реализации, но являются трендом и занимают все большее место в системах военного обучения и подготовки специалистов ВМФ, так как обеспечивают возможность учитывать индивидуальные потребности специалистов ВМФ и тем самым – высокое качество обучения. Искусственный интеллект позволяет анализировать данные об успеваемости, использовать цифровой след обучающихся, выявлять тренды и прогнозировать тенденции. Это помогает улучшить образовательные стратегии и планирование, оптимизировать расписание занятий и повышать эффективность всего процесса обучения и подготовки специалистов ВМФ, что приобретает особую значимость в условиях СВО.

Список используемых источников

1. Печников А. Н., Печникова Л. Г., Шиков А. Н. О формах и форматах обучения специалистов Военно-морского флота // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2024. – № 1 (29). – С. 374–383.
2. Дьячков Д. Б., Дьячкова Е. В. Обзор и анализ технологий для адаптивного обучения // E-Scio. – 2022. – № 12 (75). – С. 62–71.
3. Анализ и новые тенденции использования нейросетей и искусственного интеллекта в современной системе высшего образования / М. С. Якубов [и др.] // Экономика и социум. – 2021. – № 5-2 (84). – С. 1148–1161.
4. Родионов О. В., Тамп Н. В. Технологии искусственного интеллекта в образовании // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2022. – № 22. – С. 64–74.

5. Nur Fitria, Tira. Artificial Intelligence (AI) In Education: Using AI Tools for Teaching and Learning Process. – URL: <https://kejarcita.id/> (дата обращения: 25.04.2024).
6. Lecture Notes in Computer Science / L. Kang [et al.]. – Springer Cham., 2019. – P. 459–472.
7. Natural TTS Synthesis by Conditioning Wavenet on MEL Spectrogram Predictions / J. Shen [et al.] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – Calgary, AB, Canada, 2018. – P. 4779–4783. – DOI: 10.1109/ICASSP.2018.8461368.
8. Carrasco M. & Pato M. A Potts Neural Network Heuristic for the Class // Teacher Timetabling Problem. – 2003. – DOI: 10.1007/978-1-4757-4137-7_8.

С. А. Блинкова¹,

кандидат технических наук, доцент;

К. С. Веляева¹;

Д. В. Новиков²;

Е. В. Черняев³,

кандидат экономических наук

¹Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара.

²Куйбышевская железная дорога по территориальному управлению, г. Самара.

³Вольский военный институт материального обеспечения, г. Вольск.

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОГЛАСОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И ОТРАСЛЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ НАУЧНО-ИННОВАЦИОННОЙ ПРОДУКЦИИ В КООПЕРАЦИОННОЙ ЦЕПИ

В условиях, когда реализация крупных инфраструктурных и отраслевых проектов сопряжена с привлечением большого количества экономических агентов, возрастает риск срыва сроков выполнения работ и снижения их качества. В статье разработана экономико-математическая модель согласования функционального и отраслевого взаимодействия исполнителей научно-инновационной продукции в кооперационной цепи. В рамках исследования применен алгоритм Калмана для прогнозирования текущего состояния процесса создания научно-инновационного продукта. Разработка такой модели представляется актуальной и значимой для повышения эффективности и надежности выполнения крупных проектов, минимизации рисков и улучшения качества конечного продукта.

Ключевые слова: отраслевые проекты, кооперационная цепь, модель согласования взаимодействия исполнителей, алгоритм Калмана, создание научно-инновационного продукта, прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

Целью исследования является разработка экономико-математической модели согласования функционального и отраслевого взаимодействия исполнителей научно-инновационной продукции в кооперационной цепи. В современных условиях, когда реализация крупных инфраструктурных и отраслевых проектов связана с привлечением большого количества экономических агентов, возрастает риск срыва сроков выполнения работ и снижения их качества, поэтому разработка такой модели в настоящее время представляется весьма актуальной. Для достижения заявленной цели поставлены и решены следующие основные задачи: разработка модели и использование алгоритма Калмана для прогнозирования текущего состояния процесса создания научно-инновационного продукта.

Методологической основой исследования являются раздел математики, посвященный матрицам и операциям с ними; теория автоматического управления, включая идентификацию динамических объектов. Проведенное исследование опиралось на результаты научных исследований экономической научной школы Приволжского государственного университета путей сообщения [1–13].

ИССЛЕДОВАНИЕ

Минимально неделимым элементом, или единицей экономико-математической модели, является стоимость единицы работы, выполняемой коллективом работников центра компетенции за единицу времени. Стоимость работ (C , *cost*) в таком случае представляет собой

функционал от объема работы (W , *works*), доли работы, выполняемой коллективом (R , *ratio*), времени выполнения работы (D , *duration*) и качества работы (Q , *quality*):

$$C = f(W \cdot R, D, Q). \quad (1)$$

Учитывая экономический характер функциональных составляющих (все они могут быть финансово оценены), функция единиц экономико-математической модели может быть представлено через произведение соответствующих коэффициентов при соблюдении условий по времени и качеству:

$$\begin{aligned} C &= W k_R k_D k_Q, \\ k_R k_D k_Q &= 0 \dots 1, \\ k_D &\in k_{D,\text{доп}} \dots 1, \\ k_Q &\in k_{Q,\text{доп}} \dots 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Элементом (звеном) функционального и отраслевого взаимодействия исполнителей кооперационной цепи будет выступать субъект экономической деятельности (подрядчик), работу которого в рамках исполнения контракта можно представить в виде матрицы размерностью $m \times n$, где m – максимальное количество видов работ, на которое можно дифференцировать общий объем W , n – максимальное количество компетенций всех потенциальных субъектов экономической деятельности:

$$C = c(i, j) = \begin{bmatrix} W_{11} k_{R.11} k_{D.11} k_{Q.11} & W_{12} k_{R.12} k_{D.12} k_{Q.12} & W_{1n} k_{R.1n} k_{D.1n} k_{Q.1n} \\ W_{21} k_{R.21} k_{D.21} k_{Q.21} & W_{22} k_{R.22} k_{D.22} k_{Q.22} & W_{2n} k_{R.2n} k_{D.2n} k_{Q.2n} \\ W_{m1} k_{R.m1} k_{D.m1} k_{Q.m1} & W_{m2} k_{R.m2} k_{D.m2} k_{Q.m2} & W_{mn} k_{R.mn} k_{D.mn} k_{Q.mn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В случае равенства условий по времени и качеству, а также одинаковой доли работ в рамках одного (h) субъекта экономической деятельности (подрядчика), выражение (3) может быть представлено в виде скалярного произведения:

$$C = c(i, j) = k_{R,h} k_{D,h} k_{Q,h} \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{1n} \\ W_{21} & W_{22} & W_{2n} \\ W_{m1} & W_{m2} & W_{mn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В практике возможны варианты множественной цепочки выполнения работ (варианты использования нескольких субподрядчиков). В таком случае речь идет о трехмерной матрице – многомерном массиве, который является расширением двухмерной матрицы. Элемент такой трехмерной матрицы имеет три индекса: первые два (i, j) вместе с индексами строк и столбцов такие же, как и у двухмерной матрицы. Третий индекс (h) в трехмерной матрице используется для представления цепочки субъектов экономической деятельности (подрядчиков). Эта экономико-математическая модель представлена на рис. 1.

С учетом предложенного матричного подхода опишем стоимость выполнения всего объема работ:

$$C = \sum_{h=1}^z \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n W_{i,j,h} k_{R,i,j,h} k_{D,i,j,h} k_{Q,i,j,h}. \quad (5)$$

В качестве критерия эффективности согласования функционального и отраслевого взаимодействия исполнителей кооперационной цепи выбрана система условий: обеспечение минимальной стоимости результата $C(z)$ при обеспечении максимальных качества $k_{Q,z}$ и скорости $k_{D,z}$ выполнения работы, а также соблюдения условия нахождения коэффициентов $k_{Q,z}$ и $k_{D,z}$ в пределах допустимых значений (условий выполнения работ) во времени:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{Q,z} \geq k_{Q,\text{доп}}, k_Q \in k_{Q,\text{доп}} \dots 1; \\ k_{D,z} \geq k_{D,\text{доп}}, k_D \in k_{D,\text{доп}} \dots 1; \\ k_{Q,z} \rightarrow \max, k_{D,z}(t_i), \forall_i \in T; \\ k_{D,z} \rightarrow \max, k_{D,z}(t_i), \forall_i \in T; \\ C_z \rightarrow \min, C_z(t_i), \forall_i \in T. \end{array} \right. \quad (6)$$

В выражение (6) добавлена функция времени, поскольку критерий качества должен быть обеспечен в течение всего цикла производства работ.

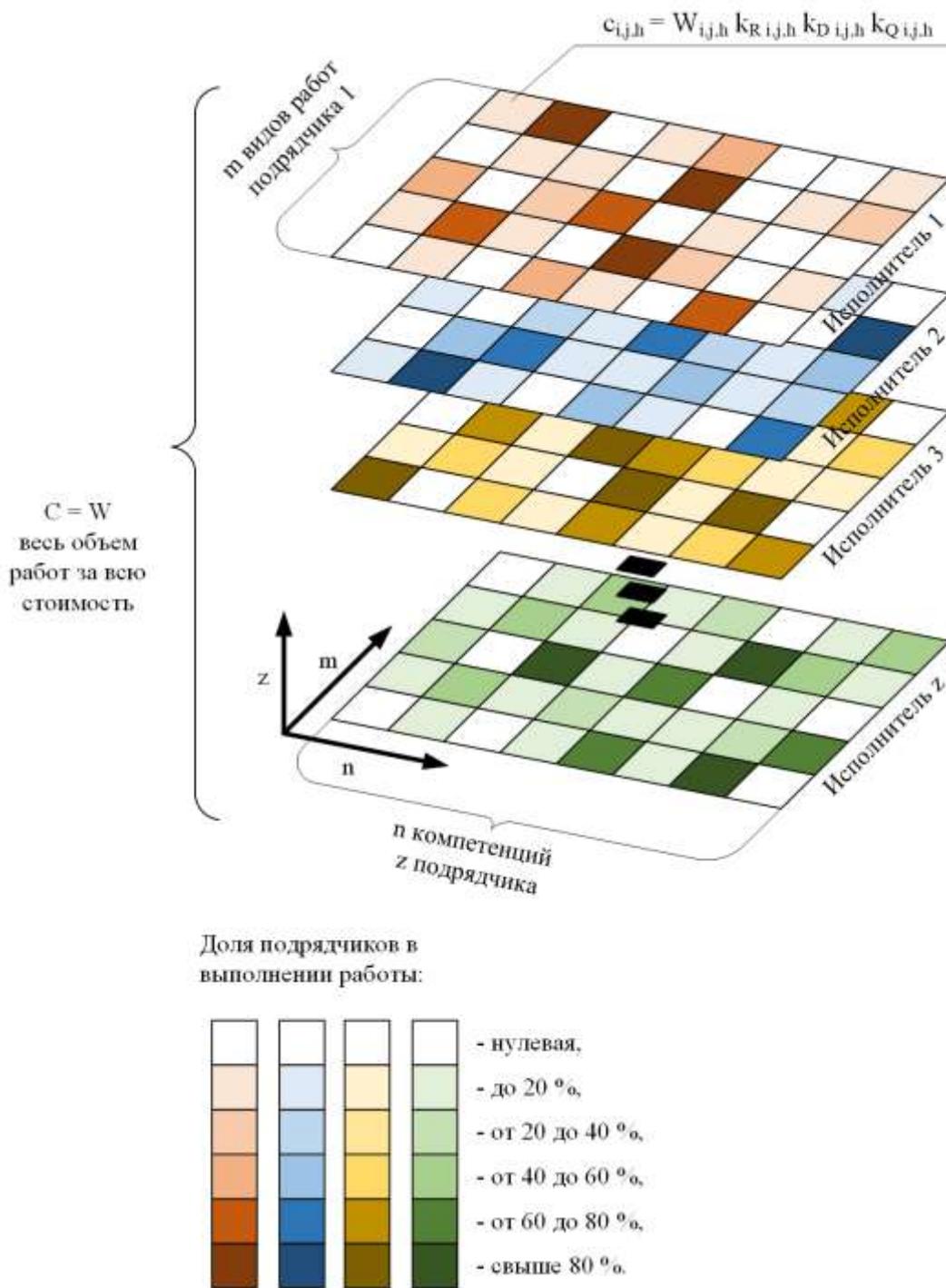


Рис. 1. Экономико-математическая модель согласования функционального и отраслевого взаимодействия исполнителей кооперационной цепи

Сформулированный выше критерий эффективности согласования функционального и отраслевого взаимодействия исполнителей научно-инновационной продукции в кооперационной цепи является задачей дискретной оптимизации и может иметь множество решений в виде нахождения локальных экстремумов методами линейного программирования.

Представим процесс создания научно-инновационной продукции в виде функции выполнения работ (*works*) во времени $w=f(t)$ на отрезке времени $t_1 - t_2$. Тогда средний показатель процесса будет представлять собой среднее либо среднее взвешенное значение исполнителей 1, 2, 3 ... z (рис. 2).

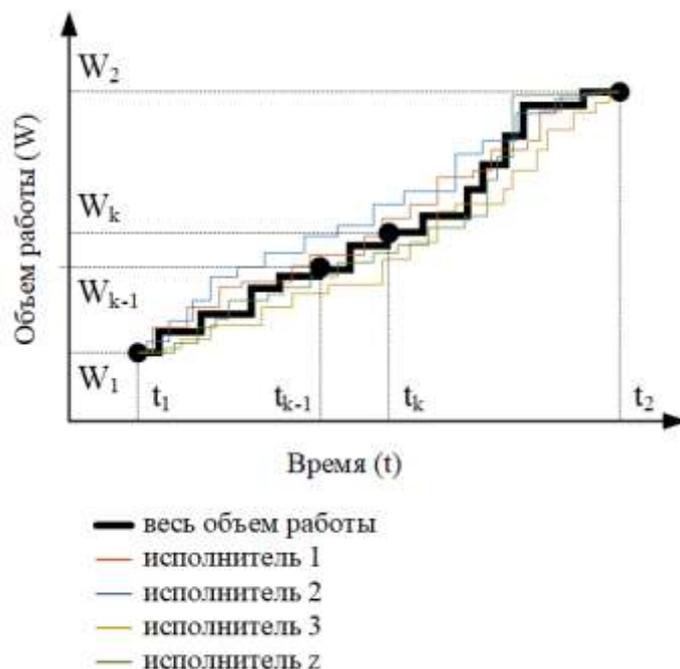


Рис. 2. Процесс создания научно-инновационной продукции

Функциональное и отраслевое взаимодействие исполнителей научно-инновационной продукции в кооперационной цепи предполагает контроль хода реализации работы в части объема и качества. В этой связи возникает актуальность идентификации состояния процесса в момент времени t_k . Практика реализации крупных научно-инновационных проектов предполагает наличие различной степени неопределенности. Указанная задача относится к задаче идентификации динамической системы в условиях неопределенности и может быть решена с помощью алгоритма Калмана. Большинство задач, в которых используется фильтр, относятся к техническим системам, где необходимо определить положение объекта в пространстве. Также известны задачи в области финансов, связанные с прогнозом временных рядов. В рамках настоящего исследования фильтр применяется для идентификации состояния процесса создания научно-инновационной продукции в кооперационной цепи. Большое количество исполнителей и соисполнителей часто приводит к неоправданным задержкам и, как следствие, к срыву сроков выполнения. Алгоритм Калмана позволяет идентифицировать реальное состояние как отдельных видов работ, так и их совокупности.

Рассмотрим работу алгоритма. Допустим, процесс создания научно-инновационной продукции в момент времени t_k имеет позицию

$$\vec{x}_k = (\vec{q}, \vec{w}). \quad (7)$$

В нашем случае это объем работы (*works*) и качество (*quality*). Информацию об указанных двух параметрах получаем дискретно через различные промежутки времени и по ним составляем полную картину развития процесса. Тогда исходные данные будут представлять собой матрицу

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} q \\ w \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Фильтр предполагает, что обе переменные случайны и имеют гауссово распределение. Каждая переменная имеет среднее значение μ – центр случайного распределения и наиболее вероятное состояние, а также дисперсию σ^2 , являющуюся мерой неопределенности.

Смоделируем наше знание о текущем состоянии через ковариационную матрицу Q_k :

$$\hat{x}_k = \begin{bmatrix} \text{quality} \\ \text{works} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$Q_k = \begin{bmatrix} \Sigma_{qq} & \Sigma_{qw} \\ \Sigma_{wq} & \Sigma_{ww} \end{bmatrix}.$$

Обозначим через F_k шаг прогнозирования (рис. 3)

$$\hat{x}_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{x}_{k-1} = F_k \hat{x}_{k-1}. \quad (10)$$

После преобразования получим:

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1}, \quad (11)$$

$$Q_k = F_k Q_{k-1} F_k^T.$$

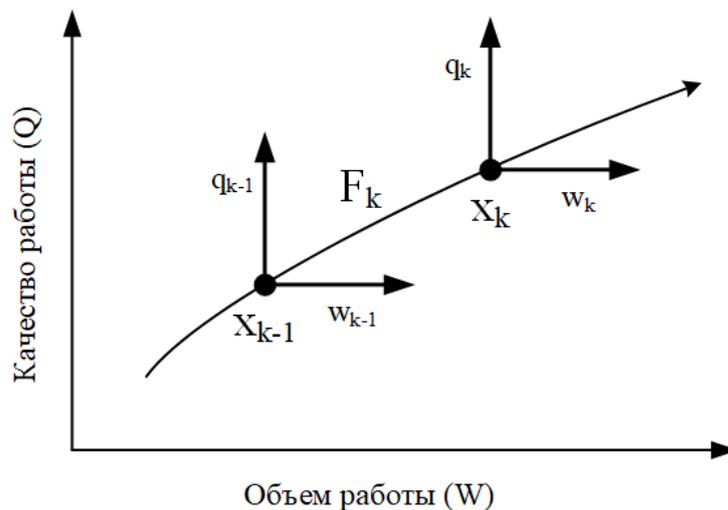


Рис. 3. Фазовый переход

В реальности на процесс создания научно-инновационной продукции влияет внешняя среда, которая может быть учтена в системе вектором \vec{u}_k . Тогда

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1} + \begin{bmatrix} \Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix} a = F_k \hat{x}_{k-1} + B_k \vec{u}_k, \quad (12)$$

где a – ожидаемое смещение, вызванное управлением;

B_k – матрица управления.

Расширенную ковариацию получим, прибавив C_k :

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1} + B_k \vec{u}_k, \quad (13)$$

$$Q_k = F_k Q_{k-1} F_k^T + C_k.$$

Теперь можно перейти к моделированию процесса с помощью матрицы θ_k :

$$\vec{\mu}_{expected} = H_k \hat{x}_k, \quad (14)$$

$$\Sigma_{expected} = H_k Q_k \theta_k^T.$$

Обозначим $\vec{\tau}_k$ за ошибку определения текущего состояния. Тогда коэффициент усиления Калмана (рис. 4) составит

$$K' = Q_k \theta_k^T (\theta_k Q_k \theta_k^T + R_k)^{-1}. \tag{15}$$

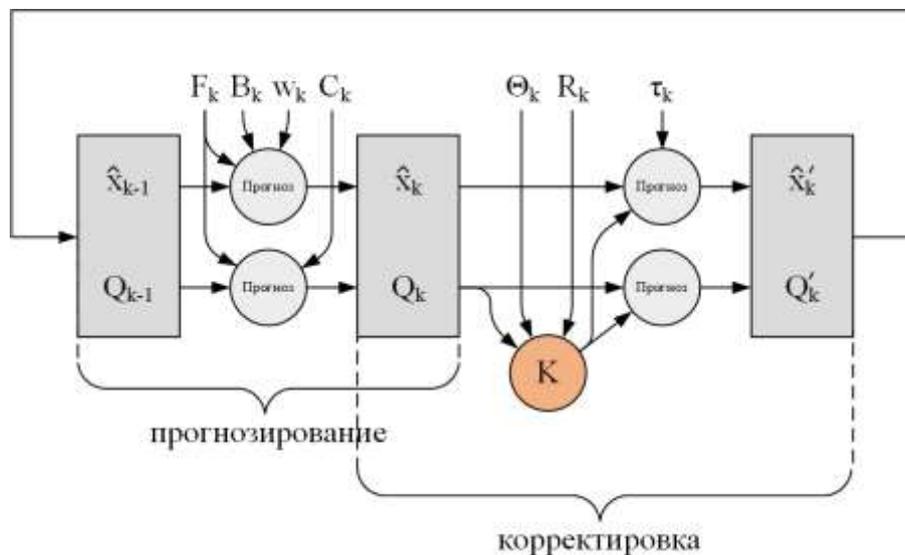


Рис. 4. Алгоритм Калмана для идентификации состояния процесса

А полные уравнения для шага обновления будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{x}'_k &= \hat{x}_k + K'(\vec{\tau}_k - \theta_k \hat{x}_k), \\ \hat{Q}'_k &= Q_k - K' \theta_k Q_k. \end{aligned} \tag{16}$$

На рис. 4 представлена схема алгоритма Калмана. Она состоит из двух последовательных операций: прогнозирования и корректировки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная экономико-математической модель согласования функционального и отраслевого взаимодействия исполнителей научно-инновационной продукции в кооперационной цепи позволит повысить эффективность и надежность выполнения крупных проектов, минимизировать риски и улучшить качество конечного продукта. В рамках исследования применен алгоритм Калмана для прогнозирования текущего состояния процесса создания научно-инновационного продукта, который включает две последовательные операции: прогнозирование и корректировку. Алгоритм Калмана позволяет идентифицировать реальное состояние как отдельных видов работ, так и их совокупности.

Список используемых источников

1. Гаранин М. А. Влияние «цифровых двойников» на экономику общественного сектора // Креативная экономика. – 2018. – Т. 12, № 11. – С. 1733–1758. – DOI: 10.18334/се.12.11.39605.
2. Гаранин М. А. Трансформация университета в центр пространства внедрения инноваций // Вопросы инновационной экономики. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 955–968. – DOI: 10.18334/vines.9.3.40957.

3. *Гаранин М. А.* Модель управления университетом как центром развития компетенций // Креативная экономика. – 2019. – Т. 13, № 1. – С. 183–194. – DOI: 10.18334/ce.13.1.39667.
4. *Гаранин М. А., Волов В. Т.* Трансформация высшей школы // Вестник СамГУПС. – 2022. – № 2(56). – С. 9–13.
5. *Гаранин М. А.* Транспортное образование в мире // Профессиональное образование и рынок труда. – 2020. – № 3. – С. 61–71. – DOI: 10.24411/2307-4264-2020-10309.
6. *Гаранин М. А., Горбунов Д. В.* Роль образовательной программы в университете 4.0 // Креативная экономика. – 2018. – Т. 12, № 12. – С. 2017–2034. – DOI: 10.18334/ce.12.12.39666.
7. *Гаранин М. А.* Институциональные аспекты управления ресурсами отраслевых вузов // Экономика и предпринимательство. – 2020. – № 7(120). – С. 1150–1156. – DOI: 10.34925/EIP.2020.120.7.238.
8. *Гаранин М. А.* Модель взаимодействия Министерства науки и высшего образования и Министерства транспорта в части кадрового обеспечения транспорта // Креативная экономика. – 2020. – Т. 14, № 6. – С. 1055–1078. – DOI: 10.18334/ce.14.6.110277.
9. *Garanin M. A., Krasnova E. A.* Management Model of Innovative University // Modern Global Economic System: Evolutional Development vs. Revolutionary Leap : Institute of Scientific Communications Conference. – Cham : Springer Nature, 2021. – Vol. 198. – P. 1463–1475. – DOI: 10.1007/978-3-030-69415-9_162.
10. *Гаранин М. А., Иващцева К. А.* Цифровые образовательные платформы: структура и принципы работы // Техник транспорта: образование и практика. – 2023. – Т. 4, № 2. – С. 126–136. – DOI: 10.46684/2687-1033.2023.2.126-136.
11. *Гаранин М. А., Болгова В. В.* Модель оценки качества работы преподавателя в механизме контроля качества реализации основной профессиональной образовательной программы // Азимут научных исследований: педагогика и психология. – 2018. – Т. 7, № 2(23). – С. 63–67.
12. Развитие системы профессионального образования на основе продуктов цифровой экономики / В. Т. Волов [и др.] // Вопросы инновационной экономики. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 987–1004. – DOI: 10.18334/vines.13.2.118217.
13. *Garanin M. A.* Implementation of innovations in higher education institutions // Política e Gestão Educacional. – 2022. – Vol. 26, № S2. – P. 022072. – DOI: 10.22633/rpge.v26iesp.2.16571.

Bogachev E. E., Petukhov A. M. A methodological approach to distribution of personnel of an organizational and technical system by temporary formations // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 6–12.

The article describes a methodical approach to distribution of personnel of an organizational and technical system by temporary formations for the period of implementation of measures to increase the system's readiness to perform application tasks.

Key words: organizational and technical systems for military purposes, distribution of personnel.

Kadochnikov A. P., Petrich D. O., Prorok V. Y. Investigation of performance losses of computing systems to ensure the required efficiency of processing information about space objects // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 13–26.

The work is devoted to the study of issues of performance losses of computing systems operating as part of automated systems for processing information about space objects, taking into account factors characteristic of typical tasks solved by computing tools. The main purpose of the work is to ensure the required efficiency of processing information about space objects based on forecasting performance losses of computing systems. The results of the study will make it possible to reasonably formulate requirements for the architecture and characteristics of automated systems for processing information about space objects.

Key words: computer system, automated system, trajectory, space object, computer system architecture, performance, programming, testing.

A model for analyzing binary code of programs based on machine learning methods / *D. V. Nagibin, A. A. Platonov, V. Y. Russu, T. R. Sabirov* // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 27–42.

The article proposes an approach to program research by applying a binary code analysis model based on machine learning methods. The model is created by sequentially converting the binary code of programs from various forms of representation (abstract syntactic tree, token structures and instructions) to datasets (metrics of representation forms) and creating machine learning models based on them.

Key words: software, machine learning algorithms, machine learning models

Bacholdin V. S., Dobrikov V. A. Improving of GLONASS user navigation equipment positioning accuracy by means of iono-spheric parameters estimation // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 43–49.

The real-time method for correction of pseudo-distance measurements ionospheric error in the navigation user equipment is proposed. Analytical relations for extended Kalman filter with user's PVT vector including additional components: vertical electron concentration and its gradients by latitude and longitude are presented. The results of the considered method experimental testing are given.

Key words: pseudo-distance measurements, ionospheric error, electron concentration, navigation task

Dmitriev A. K. Failure detection of functional elements of the network infrastructure of a special purpose data processing center that does not require additional diagnostic support by analyzing packets of standard data transmission protocols // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 50–56.

The issues of ensuring the stability of automated military systems by ensuring full observability of the network infrastructure of a special purpose data processing center are considered. An assessment of the required resources has been carried out to determine the technical condition of a medium-scale data center, subject to full observability. Methods of reducing the required resources are proposed and their results are evaluated. Packet data transmission protocols (IP, FC) are analyzed and general diagnostic indicators are determined. The conclusion is made about the need to parallelize the collection and processing of diagnostic information in the network infrastructure of data centers.

Key words: automated military systems, special purpose data processing center, network infrastructure, reliability, monitoring, diagnostics, full observability, FibreChannel, Internet Protocol.

Konishev V. S., Malcsev G. N. Methodology for analyzing the immunity of interference of command and measurement systems with phase-manipulated signals with spectrum expansion in conditions of narrowband interference // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 57–66.

The methodical approach to analyzing noise immunity of information channels of command and measurement systems with phase-manipulated signals with spectrum expansion in conditions of joint action of broadband and narrowband interference. action of broadband and narrowband interference. It is assumed that in the receiving device of the command and measurement system at the allocation of code symbols transmitted information messages are carried out correlation distinction signals and the impact on the reception of signals interference are characterized by the equivalent signal-to-noise ratio. Narrowband interference is characterized by parameter included in the general expression for the equivalent signal-to-noise ratio. The results of calculations of the probability of erroneous reception of binary symbols in the information channel of the command and measurement system depending on the signal/interference ratio at the on the signal-to-noise ratio at different values of the narrowband interference parameter. interference.

Key words: noise immunity, signals with spectrum extension, pseudo-random sequence. correlation reception, narrowband interference, equivalent signal/interference ratio. interference, equivalent signal-to-noise ratio.

Kopalov Y. N., Maslakov P. A., Parshutkin A. V. Model of communication channel with orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) functioning under conditions of episodic synchronization with pulse interference flows // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 67–75.

The article proposes A model of the effect of non-stationary unintended interference on the reception of signals from OFDM under conditions of episodic synchronization of frames transmitted in the communication channel and interference. The calculation of the probability of erroneous reception of a frame from the signal-to-interference ratio, as well as from the duration of the interference pulse is presented. It is shown at which ratios of the duration of the interference pulse and the duration of the frame, the probability of erroneous reception of the frame increases due to an increase in the number of errors when receiving service parts of the frames.

Key words: OFDM, noise immunity, episodic synchronization.

Assessment of electromagnetic compatibility of technical systems under conditions of energy accumulation of a sequence of electromagnetic pulses / O. I. Latanova, A. Y. Onufrey, A. V. Razumov, V. N. Shemyakin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 76-82.

The article is devoted to further improvement of methodological support when conducting research to assess the electromagnetic compatibility of technical systems under the influence of electromagnetic pulses of natural and artificial origin. It is shown that when solving the problem of ensuring electromagnetic compatibility of technical systems under the influence of electromagnetic

pulses, it is also necessary to solve the problem of ensuring the resistance of the technical system to the effects of a sequence of electromagnetic pulses. For this purpose, an analytical model is proposed for calculating the criterion levels of resistance of radio-electronic equipment of technical systems under conditions of energy accumulation of a sequence of electromagnetic pulses, developed on the basis of the laws of development of processes of accumulation and “relaxation” of energy in semiconductor structures under electromagnetic influence. A distinctive feature of the model compared to previously known ones is the ability to assess electromagnetic compatibility not only when exposed to single pulses, but also when exposed to a sequence of electromagnetic pulses. An example of calculating the resistance of electronic equipment of technical systems based on the proposed model is given.

Key words: electromagnetic compatibility, resistance, technical system, radio-electronic equipment, electromagnetic pulse, model, criterion level of resistance.

Logunov S. V. Expansion of the photometric portrait of a geostationary artificial space object based on spectrophotometric information // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 83–92.

The article discusses the features of constructing a photometric portrait of a geostationary artificial space object based on the results of observation by a ground-based optical system. To classify artificial space objects, it is proposed to use the results of spectrophotometric measurements in the visible wavelength range.

Key words: artificial space object, standard star, magnitude, ground-based optical system, radiation intensity, spectrophotometric information, photometric portrait.

Safiulov D. M. Methodology for the formation of the architecture of the monitoring system of the technical condition of communication equipment of the communication node of the control point of the operational association // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 93–102.

The article describes the methodology for forming the algorithmic structure of the system for monitoring the technical condition of communication equipment of the communication node of the control point of the operational association. The algorithmic structure is one of the key components of the monitoring system architecture. The stages of forming an algorithmic structure are presented, including the selection and distribution of tasks between objects and monitoring servers, as well as the selection of control protocols and software. Optimization criteria and methods are presented that allow creating a rational structure that minimizes resource consumption and increases the system's resistance to external influences when performing monitoring and management tasks.

Key words: algorithmic structure architecture, protocol groups, rational structure, monitoring system, system approach, communication node, functional limitations.

Modeling of aerosol transport in the atmospheric boundary layer over different types of underlying surfaces using a lagrangian discrete phase model / I. A. Gotur, A. A. Korustin, A. V. Schevchenko, I. A. Yaremenko // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 103–115.

The article examines factors affecting the dispersion of aerosols in the atmosphere. A model for aerosol transport in the atmospheric boundary layer over different types of underlying surfaces based on the Lagrangian discrete phase model is presented. The results of modeling the influence of underlying surface type on aerosol sedimentation in turbulent atmosphere are presented for the following types of underlying surfaces: water surface – urban development; water surface – field; water surface – forest.

Key words: aerosol transport model, underlying surface, aerosols in atmosphere, atmospheric boundary layer.

Gotyur I. A., Ovchinnikov Y. D. Approximation of time series of observations using a model of normalizing streams with lstm cells for forecasting hazardous meteorological phenomena // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 116–123.

The paper considers the issue of modeling (approximating) the distribution function of the conditional probability density for a random process based on empirical data using normalizing flows. To generalize the temporal feature in the data, the model is built using LSTM cells.

The effectiveness of the proposed approach for modeling the conditional probability of hazardous meteorological phenomena is shown using the example of ultra-short-term forecasting of convective rainfall. It is shown that the integration of LSTM cells into the normalizing flow model increases the accuracy of the very short-term forecast of convective rainfall by taking into account the temporal structure of predictors, which is confirmed by the ROC-AUC metric. Conclusions are made on ways to further improve the efficiency of modeling atmospheric processes using machine learning models.

Key words: time series, normalizing flows, LSTM cells, conditional probability density.

The results of evaluating the accuracy of determining the spatial position of points in real time with using satellite geodetic equipment / O. V. Kycherenko, D. O. Medyannikov, S. N. Pechnikov, D. V. Sergeev // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 124–133.

The article is devoted to evaluating the accuracy of determining the spatial position of points in real time depending on the distance to the base stations commercial companies with using protocols for transmitting corrective information RTCM 3.0, RTCM 3.2. In article presents the results of experimental studies that completed on topogeodesic polygon «Lehtusi». Recommendations are given on the base stations in determining the spatial position of points.

Key words: base station, rover, real time kinematic, absolute error of measurement, network of base stations.

Andreev V. V., Lbov E. A., Maltsev G. N. Technical diagnostics of spacecraft during flight operation in the mission control center // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 134–141.

An approach to monitoring the technical condition and technical diagnostics of on-board spacecraft systems in the analysis sector of the Mission Control Center in order to increase the efficiency of spacecraft control is presented. The algorithm of monitoring the technical condition, technical diagnostics and restoration of the spacecraft's operability based on the results of processing telemetry information and the relationship of factors affecting the reliability of technical diagnostics are considered. The interrelation between the reliability and completeness of the control of the technical condition and reliability of the onboard systems of the spacecraft is analyzed and the role of a scientifically based choice of a set of monitored telemetry parameters is shown.

Key words: spacecraft, technical condition monitoring, technical diagnostics, information and telemetry support.

Ways to form a conceptual level of external design of technological equipment of rocket and space complexes / A. V. Antropova, V. V. Kozlov, A. V. Lagun, V. A. Kharchenko // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 142–149.

The article discusses theoretical principles; the synthesis of optimal design and layout solutions for units and systems of technological equipment of rocket and space complexes is a section of the external design of the complex. Options for external design are proposed with the identification of a preference system and the construction on its basis of a decisive rule for the selection of circuit solutions for technological equipment units.

Key words: synthesis, design and layout solutions, units, process equipment, external design.

Basotin E. V., Vivchar R. M., Ptushkin A. I. Proactive management of the technical condition of equipment of critical facilities // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 150–156.

Thus article discusses the issues of improving the efficiency of managing the technical condition of equipment of critical facilities through the use of proactive management strategies. The evolution of three generations of proactive management strategies is analyzed: the 1st generation – preventive, the 2nd generation – predictive and the 3rd generation, which differs from the first two in that it not only anticipates the onset of adverse events in the present, but also provides a gradual decrease in the frequency of recurrence of such events, up to their complete exclusion, in the future. The proactive strategy of the 3rd generation is proposed to be called superactive. It is shown that this strategy is the most in demand for managing the technical condition of equipment of critical facilities and, in combination with other management strategies, allows you to get significant benefits from their application. A list of necessary measures is provided to ensure the effectiveness of their application.

Key words: proactivity, strategies, proactive management, preventive management, predictive management, superactive management, critical facility, technical condition.

Process model for intelligent processing of diagnostic information in expert decision support systems structural identification of autonomous dynamic objects / A. A. Byankin, V. N. Lomtev, A. I. Loskutov, V. G. Perle, D. B. Semenyuk // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 157–169.

Formalization of processes of structural identification of autonomous dynamic objects is presented using intelligent processing of diagnostic information in expert systems for supporting real-time decision-making. A model of the process of intelligent processing of information about the state of an object and the environment is proposed in order to select the appropriate formalized method of describing the functioning of an object for solving a target task (testing or control). The structure of the expert decision-making support system for the structural identification of autonomous dynamic objects has been formed.

Key words: structural identification, intelligent information processing, expert systems, autonomous dynamic objects, diagnostic information.

Method of determining power capabilities of space rocket by changing parameters of orbit of payload launch using lateral maneuver / N. V. Gruzdev, A. A. Isupov, S. S. Stepanov, I. V. Shakmaev // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 170–178.

The article presents a technique that allows assessing the energy capabilities of a space rocket when performing a lateral maneuver on an active section of the flight path. The proposed technique allows calculating the mass of propellant components required to perform the lateral maneuver and the maximum weight of the payload put into orbit with the required inclination.

Key words: space rocket, active section of flight path, lateral maneuver, payload.

Zubkov A. V., Fominov I. V. Investigation of the effect of transient vibration disturbances on the errors of the strapdown inertial navigation system of the launch vehicle // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 179–188.

The results of the study of the influence of linear oscillations of the launch vehicle body on the accuracy of determining the navigation parameters of the strapdown inertial navigation system are presented. It is shown that the influence of longitudinal and transverse vibrations leads to systematic errors of accelerometers and a significant increase in errors in determining navigation parameters of the launch vehicle. Developed proposals to reduce the level of strapdown inertial navigation system

errors based on the use of adaptive inertial probes and strapdown inertial navigation system algorithms.

Key words: strapdown inertial navigation system, launch vehicle, vibration disturbances, adaptation.

Kalyuta A. N., Maltsev G. N., Yakimov V. L. Information and telemetry support for control of spacecraft with a minimum level of autonomy using generalized technical condition parameters // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 189–195.

The principles of information and telemetry support for spacecraft control with a high level of autonomy are considered. The necessity of using generalized parameters of on-board systems technical condition and spacecraft in general for planning cycles of full telemetry control and decision support for spacecraft control is substantiated. A comparative analysis of methods for the formation of generalized parameters based on formal mathematical transformations of diagnostic parameters is carried out and the use of spacecraft technical condition generalized parameters of formed on the basis of weighted summation is proposed.

Key words: spacecraft, high level of autonomy, information and telemetry support, generalized parameters of technical condition.

Kamchalov S. S., Karagodin V. V., Rybakov D. V. Models of the power supply system to evaluate its parameters in various modes of operation of consumers // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 196–203.

The experience of operating power supply systems (SES) of military infrastructure facilities (OVI) in the conditions of a special military operation shows the need to ensure operational control of the SES and the operating modes of its main electrical equipment, depending on the prevailing situation. The analysis of the SES operability and the development of control actions in these conditions are impossible without performing mathematical calculations to determine the parameters of the main equipment in various modes of operation of the electric network. The article proposes an approach to the construction of an SES, which provides an increase in the reliability of power supply to consumers in various modes of operation of consumers of OVI. To evaluate the parameters of the SES of the OVI, mathematical models have been developed that take into account the peculiarities of the electric supply of consumers of the OVI from both the external power supply system (energy supply organization system) and from a backup (autonomous) source of electric energy.

Key words: power supply system, mathematical model, military infrastructure facility, parameters of the system, mode of operation.

Kargu D. L., Steganov G. B., Yanguzov A. V. Modeling the operational modes of an electric energy storage device for a satellite solar power supply system // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 204–215.

The article considers the possibility to increase active life of spacecraft by extension lifetime of the on-board electric energy storage device. Digital models of a combined storage device are presented also the results of modeling its various operating modes are visualized by time charts of changes in the load current and voltage values. The characteristics of the combined electric energy storage layout are presented. The practical implementation options of a combined electric energy storage device as part of the spacecraft's power supply system are proposed.

Key words: spacecraft, on-board power supply system, storage battery, supercapacitor unit, combined storage device for electric energy.

Intelligent decision support functions for testing and operating space rocket products using fuzzy inference rules / V. A. Klykov, V. N. Lomtev, A. I. Loskutov, V. G. Perle, D. B. Semenyuk // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 216–225.

Presented is the formation of fuzzy logical inference rules to support decision-making on model selection during testing and operation of rocket and space technology products. It is proposed to use fuzzy logic and neural networks to form rules of logical conclusions when making decisions on the choice of models. Matrices of expert knowledge were formed when formalizing a fuzzy output for on-board equipment, which make it possible to form many (all variety) training vectors of the neural network.

Key words: rocket and space technology products, fuzzy rules of logical conclusion, neural networks.

Organization of a computational experiment in assessing the danger of hitting an unmanned aerial vehicle with fragments of its own bombs / L. A. Maslova, S. M. Muzhichuk, A. K. Savenko, A. A. Skrynnikov, S. V. Khrulin // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 226–236.

An approach to the organization of a computational experiment to assess the danger of hitting an unmanned aerial vehicle with fragments of its own aviation bombs under specified conditions of combat use is proposed. The problem of hazard assessment is formalized as a problem of the theory of statistical inference – the task of testing a hypothesis about the probability of a rare random event with a complex alternative hypothesis. The application of a randomized decision-making rule based on the results of computational experiments is justified. The required sample size is justified. An example is given of determining the required sample size and formulation of the decisive rule when testing the hypothesis of the safety of specified bombing conditions from an unmanned aerial vehicle at specified values of the level of significance, power and the maximum permissible probability of hitting an unmanned aerial vehicle with fragments of its own bombs.

Key words: unmanned aerial vehicle, bombing, safety of combat use, mathematical statistics.

Naumchik I. V., Pomoshnik M. V., Prilutsky I. K. Improving the performance of the compressor station of the gas supply system of the launch complex based on a mathematical model of working processes in the piston stage, taking into account acoustic boost // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 237–247.

The results of the study of the influence of resonant gas dynamic and thermodynamic phenomena in the suction system of the piston compressor stage on the technical and economic indicators of its operation: productivity, power consumption, temperature conditions and, as a result, the reliability of gas distribution organs are presented. Resonant operational characteristics of the compressor station stage of the 8G311 system of the 17P32-3 launch complex have been obtained. Based on the results of a numerical study, the optimal lengths of the suction pipeline were determined, allowing to achieve maximum compressor performance in the mode of resonant intensification of its operation. The scientific solution to the problem is based on the application of the modernized package product KOMDET-VKA(M), which is based on a mathematical description of the properties of real gases, gas, gas-liquid and steam-stuffy mixtures and ongoing physical processes based on the fundamental equations of thermodynamics of a body of variable mass, heat transfer and mass transfer, mechanics and gas dynamics in combination with a set of empirical coefficients and dependencies obtained during the testing of constructively diverse simulation devices, laboratory and full-scale samples of reciprocating machines, different in purpose, geometric dimensions of the cylinders, operating parameters.

Key words: reciprocating compressor, gas supply system, current operating processes, integral parameters, resonant vibrations, suction pipeline, mathematical model.

Menisov A. B., Chernishev V. V. Assessment of the quality of exercises of physical training based on artificial neural networks // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 248–252.

Artificial intelligence technologies have enabled the growing productivity of data analysis in the sports industry. It is worth noting the importance and potential application of technical vision in assessing the performance of physical training exercises. The article describes an approach based on artificial neural networks for processing key points of athletes' postures during physical exercise. The authors also presented the results of experimental studies with various types of neural network architectures.

Key words: physical training, neural network, human pose assessment.

Pechnikov A. N., Shikov A. N. Prospects for the use of artificial intelligence in the process of adaptive education and training of Navy specialists // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 694. – P. 253–259.

The research on the use of artificial intelligence in the process of adaptive education and training of Navy specialists is presented. The importance and relevance of the introduction of adaptive training and advanced training of specialists, primarily contract service, is substantiated. The main directions of the development of adaptive learning technologies in the aspects of automation of testing and verification of work, personalization and formation of individual learning trajectories, the use of educational analytics to improve educational strategy and planning of the educational process, optimize the schedule of classes and increase the effectiveness of the entire process of training and training of Navy specialists are formulated.

Key words: adaptive learning, adaptive testing, individual learning trajectory, artificial intelligence, machine learning, training of Navy specialists.

Economic and mathematical model of coordination of functional and sectoral interaction of performers of scientific and innovative products in the cooperative chain / S. A. Blinkova, K. S. Velyaeva, D. V. Novikov, E. V. Chernyaev // Proceedings of the Military Space academy named after A. F. Mozhaisky. – SPb. : MSA named after A. F. Mozhaisky, 2024. – Release 676. – P. 260–266.

In conditions when the implementation of large infrastructure and industry projects involves the involvement of a large number of economic agents, the risk of disruption of work deadlines and a decrease in their quality increases. The article develops an economic and mathematical model for coordinating the functional and sectoral interaction of performers of scientific and innovative products in the cooperative chain. As part of the study, the Kalman algorithm was used to predict the current state of the process of creating a scientific and innovative product. The development of such a model seems relevant and significant for improving the efficiency and reliability of large-scale projects, minimizing risks and improving the quality of the final product.

Key words: industry projects, a cooperative chain, a model for coordinating the interaction of performers, the Kalman algorithm, the creation of a scientific and innovative product, forecasting.

Андреев Вадим Владимирович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-75, e-mail: vka@mil.ru

Антропова Александра Владимировна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-97-19, e-mail: vka@mil.ru

Басотин Евгений Викторович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 273-47-82, e-mail: vka@mil.ru

Бахолдин Владимир Станиславович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-33, e-mail: vka@mil.ru

Блинкова Светлана Александровна, кандидат технических наук, доцент; ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения» (443066, Россия, Самарская область, Самара, ул. Свободы, 2 В); тел.: 8 (927) 755-35-97, e-mail: blinkova@samgups.ru

Богачев Евгений Евгеньевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-99-84, e-mail: vka@mil.ru

Бянкин Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (994) 424-46-87, e-mail: vka@mil.ru

Веляева Карина Сергеевна, ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения» (443066, Россия, Самарская область, Самара, ул. Свободы, 2 В); тел.: 8 (917) 036-13-55, e-mail: k.velyayeva@samgups.ru

Вивчарь Роман Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 686-99-46, e-mail: vka@mil.ru

Готюр Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Груздев Николай Валентинович, кандидат военных наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); vka@mil.ru

Дмитриев Алексей Константинович, Военный университет (123001, Россия, Москва, ул. Большая Садовая, 14, стр. 1); тел.: 8 (929) 613-44-62, e-mail: da-system@ya.ru

Добриков Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-33, e-mail: vka@mil.ru

Зубков Антон Викторович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 933-13-80, e-mail: vka@mil.ru

Исупов Александр Анатольевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); vka@mil.ru

Кадочников Андрей Павлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

Калюта Андрей Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

Камчалов Сергей Сергеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Карагодин Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Каргу Дмитрий Леонидович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22 e-mail: vka@mil.ru

Клыков Владимир Алексеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (994) 424-46-87, e-mail: vka@mil.ru

Козлов Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

Конищев Виталий Сергеевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-75, e-mail: vka@mil.ru

Копалов Юрий Николаевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35, e-mail: vka@mil.ru

Корыстин Александр Александрович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mil.ru

Кучеренко Олег Валентинович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), e-mail: vka@mil.ru

Лагун Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

Латанова Ольга Иосифовна, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 237-15-10, e-mail: vka@mil.ru

Лбов Евгений Александрович, ГИКЦ МО РФ имени Г. С. Титова (143090, Россия, Московская область, Краснознаменск).

Логунов Сергей Владимирович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35, e-mail: vka@mil.ru

Ломтев Василий Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (931)-000-65-11, e-mail: vka@mil.ru

Лоскутов Андрей Иванович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (952) 264-30-64, e-mail: vka@mil.ru

Мальцев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-75, e-mail: vka@mil.ru

Маслаков Павел Андреевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35, e-mail: vka@mil.ru

Маслова Лариса Александровна, федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (125319, Россия, Москва, ул. Викторенко, 7, к. 2); тел.: 8 (915) 498-87-82, e-mail: maslova@gosniias.ru

Медяников Даниил Олегович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Менисов Артем Бакытжанович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 984-13-77, e-mail: vka@mil.ru

Мужичек Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор; федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (125319, Россия, Москва, ул. Викторенко, 7, к. 2); тел.: 8 (926) 536-95-53, e-mail: msm19@yandex.ru

Нагибин Дмитрий Владимирович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Наумчик Игорь Васильевич, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 950-31-50, e-mail: vka.spb.ru

Новиков Дмитрий Викторович, Куйбышевская железная дорога по территориальному управлению (443066, Россия, Самарская область, Самара, ул. Свободы, 2 В); тел.: 8 (927) 208-35-78.

Овчинников Юрий Дмитриевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka@mil.ru

Онуфрей Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 237-15-10, e-mail: vka@mil.ru

Паршуткин Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-35, e-mail: vka@mil.ru

Перле Виктор Геннадьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 980-16-44, e-mail: vka@mil.ru

Петрич Дмитрий Олегович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

Петухов Анатолий Михайлович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-72, e-mail: vka@mil.ru

Печников Андрей Николаевич, доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор; Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., 3); тел.: 8 (911) 922-19-82, e-mail: ran287@yandex.ru

Печников Сергей Николаевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Платонов Андрей Анатольевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Помошник Максим Викторович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (981) 988-96-37.

Прилуцкий Игорь Кирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 751-76-14, e-mail: vka.spb.ru

Пророк Валерий Ярославович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13); e-mail: vka@mil.ru

Птушкин Анатолий Иванович, кандидат технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 273-47-82, e-mail: vka@mil.ru

Разумов Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 237-15-10, e-mail: vka@mil.ru

Руссу Валерий Юрьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Рыбаков Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Сабиров Тимур Римович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-87, e-mail: vka@mil.ru

Савенко Анастасия Константиновна, федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (125319, Россия, Москва, ул. Викторенко, 7, к. 2); тел.: 8 (916) 096-58-66, e-mail: sav.anna@gosniias.ru

Сафиулов Давлет Муратович, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного (194064, Россия, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий проспект, 3.); тел.: 8 (983) 399-15-46, e-mail: davletzas@mail.ru

Семенюк Дмитрий Борисович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (904) 551-24-91, e-mail: vka@mil.ru

Сергеев Дмитрий Викторович, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Скрынников Андрей Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (125319, Россия, Москва, ул. Викторенко, 7, к. 2); федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 4); тел.: 8 (925) 090-86-87, e-mail: a1260@mail.ru

Стеганов Геннадий Борисович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Степанов Станислав Сергеевич, 1 ГИК МО РФ (164170, Россия, Архангельская обл., Мирный).

Фоминов Иван Вячеславович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-21, e-mail: vka@mil.ru

Харченко Владимир Алексеевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-14, e-mail: vka@mil.ru

Хрулин Сергей Васильевич, федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (125319, Россия, Москва, ул. Викторенко, 7, к. 2); тел.: 8 (903) 671-52-59, e-mail: burgoam@mail.ru

Чернышов Владимир Викторович, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (921) 872-95-32, e-mail: vka@mail.ru

Черняев Евгений Васильевич, кандидат экономических наук; Вольский военный институт материального обеспечения (412903, Саратовская область, Вольск, ул. М. Горького, 3); тел.: 8 (929)705 90 63, e-mail: ki-la@mail.ru

Шакмаев Игорь Витальевич, 1 ГИК МО РФ (164170, Россия, Архангельская обл., Мирный).

Шевченко Артем Васильевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mail.ru

Шемякин Виктор Николаевич, кандидат военных наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (911) 237-15-10, e-mail: vka@mail.ru

Шиков Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент; ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова» (199034, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Кадетский бульвар, 1); тел.: 8 (911) 922-09-41, e-mail: a.n.shik@yandex.ru

Якимов Виктор Леонидович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-93-75, e-mail: vka@mail.ru

Янгузов Андрей Валерьевич, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mail.ru

Яременко Иван Андреевич, кандидат технических наук; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 327-96-52, e-mail: vka-onr@mail.ru

Абдурахимов Алексей Александрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-96-12, e-mail: vka@mil.ru

Аверкиев Николай Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Авсюкевич Дмитрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-44, e-mail: vka@mil.ru

Алексеев Виктор Фёдорович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Грудинин Игорь Владимирович, доктор военных наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Девяткин Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Калинин Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Каргу Дмитрий Леонидович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-22, e-mail: vka@mil.ru

Краснов Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Ломако Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Лоскутов Андрей Иванович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Лохвицкий Владимир Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Минаков Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Миронов Андрей Николаевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: 8 (812) 347-95-74.

Новиков Евгений Александрович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Онуфрей Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Паршуткин Андрей Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Пирогов Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Полуян Максим Михайлович, кандидат технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Радионов Николай Васильевич, доктор экономических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Садин Дмитрий Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Семенов Кирилл Владимирович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Харченко Александр Викторович, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Хомоненко Анатолий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru

Якимов Виктор Леонидович, доктор технических наук, доцент; Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: vka@mil.ru