

№ 4<sup>+0</sup>  
2021 [62]

научно-технический журнал  
**ИЗВЕСТИЯ**  
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



**17** декабря  
**День РВСН**



**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,  
МЕТРОЛОГИЯ И  
ИНФОРМАЦИОННО-  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ  
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

- 2 Панчелюга В.А., Панчелюга М.С., Лесных В.Н.

О совпадении вращательных периодов двойных звездных систем с периодами в флуктуациях процессов различной природы

- 6 Смирнов В.А., Макалов А.О.

Некоторые аспекты расчета параметров входного фильтра нижних частот аналого-цифрового преобразователя

- 9 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Казаков Р.Р., Сергеев В.А.

Обоснование структуры космического аппарата двойного назначения в мирное и военное время

**РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

- 12 Зеленецкий В.В., Черноусов М.С., Зеленецкий Ю.В., Егоров В.В., Наконечный А.Б.

Математическая модель помехоустойчивой системы передачи с перемежением кодовых комбинаций и кодовым уплотнением данных

- 16 Рюмшин К.Ю., Атакищев О.И., Амелёнков А.А., Журавлёв А.П.

Особенности реализации демодулятора блочных сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией

- 20 Цветков К.Ю., Ерунов А.А., Леванов Д.В.

Формирование ключевой информации для организации скрытого канала с адаптивным кодовым уплотнением

- 28 Новиков Е.А., Зиннуров С.Х.

Моделирование процесса обслуживания Парето-потока на основе применения гипердельтовой аппроксимации

- 34 Косяков Е.Н., Мишин Д.Ю., Севостьянов А.С., Кондрашин А.Е.

Задача выбора момента включения резервного канала при угрозе перегрузки направления связи с учетом запаздывания в управлении

**ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И  
УПРАВЛЕНИЕ**

- 41 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Трофимов И.А., Слатов С.В.

Подход к усовершенствованию математической модели бортовой системы космического аппарата

- 45 Безродный Б.Ф., Любимова Л.В.

Оптимизация применения различных вариантов защиты однотипных объектов АСУ ТП

- 48 Грибунин В.Г., Лабазников А.П.

Параметрическая модель работы оператора автоматизированной системы с манипулятором типа «мышь»

- 54 Квашенников В.В.

Обобщенные каскадные помехоустойчивые коды в распознавании образов

- 60 Смуров С.В., Волков Г.Г.

Об исключительных особенностях мультинарных комплексных неабелевых алгебр

- 69 Авдеева М.М., Никитин А.К., Хижняк Л.Н., Хижняк Е.П., Якимова И.А.

Мониторинг эффективности терапии на основе анализа термографических изображений

- 72 Паршина Е.Н.

Способ оценки соответствия средств защиты информации типа межсетевой экран требованиям по безопасности информации на основе показателей, имеющих нечисловую структуру

- 75 Руденко Э.М., Семикина Е.В.

Интеллектуальный мониторинг группы БПЛА на эйлеро-гамильтоновых графах реперов на местности

- 81 Рюмшин К.Ю., Атакищев О.И., Амелёнков А.А.

Использование методов кластеризации фазовых портретов при обработке больших данных в бухгалтерском учете

**СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И  
ФАРМАЦЕВТИКА**

- 85 Ермаков А.М., Горло О.П., Краснова Ю.В., Вольский В.С., Презент М.А., Царьков А.Н., Руднев Д.С.

О способах синтеза 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фалазиндиона, как промежуточного продукта для получения активной фармацевтической субстанции 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фалазиндиона натрия (люминола натрия), основы для препарата ТАМЕРОН

- 88 Ермаков А.М., Вольский В.С., Царькова Е.А.

К вопросу об открытии люминола и люминола натрия, их кристаллических форм и лекарственных свойств

**ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И  
РОБОТОТЕХНИКА**

- 93 Антохин Е.А., Атакищев О.И., Умников Е.В., Грачёв Д.В.

Проблемные вопросы внедрения стандартизации и унификации в практику разработки и создания роботизированных образцов вооружения

**ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ  
ОБРАЗОВАНИЕ**

- 98 Обыкновенный И.А., Федоренко Ю.Н., Обыкновенная Я.И.

Совершенствование системы военного образования – важнейшее направление обеспечения обороноспособности и национальной безопасности

- 100 СОБЫТИЯ

- 101 AUTHORS

- 103 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

- 104 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ  
СТАТЕЙ

**Научно-технический журнал**

**ИЗВЕСТИЯ  
Института инженерной физики**  
№4 (62) 2021

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК»  
по научным специальностям:

2.2.11. Информационно-измерительные  
и управляющие системы

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

2.3.1. Системный анализ, управление  
и обработка информации

2.3.6. Методы и системы защиты информации,  
информационная безопасность

**Главный редактор,  
председатель редакционного совета  
и редакционной коллегии**

**Алексей Николаевич Царьков**

Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ»,  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Редакционный совет**

**Геннадий Иванович Азаров**

главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИИ МО РФ»  
заслуженный деятель науки РФ, заслуженный  
изобретатель РФ, лауреат Государственной  
премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Сергей Владимирович Дворянкин**  
начальник департамента Государственной  
корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ,  
доктор технических наук, профессор

**Николай Михайлович Емелин**

главный научный сотрудник  
ФГБНУ «Госметодцентр»,  
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,  
доктор технических наук, профессор

**Валерий Иванович Николаев**

научный референт ОАО «Концерн «Созвездие»,  
лауреат Государственной премии СССР,  
лауреат премии Правительства РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Владимир Георгиевич Редько**

заместитель руководителя  
Центра оптико-нейронных технологий  
НИИ системных исследований РАН,  
доктор физико-математических наук

**Юрий Александрович Романенко**

старший научный сотрудник  
филиала ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Александр Викторович Синьговский**

старший научный сотрудник  
Европейского центра ядерных исследований (CERN),  
Adjunct Assistant Professor  
Университета Миннесоты (США),  
кандидат физико-математических наук

**Анатолий Васильевич Тодосийчук**

главный советник аппарата Комитета ГД ФС РФ  
по образованию и науке,  
почетный работник науки и техники РФ,  
доктор экономических наук, профессор

**Александр Павлович Царёв**

заведующий кафедрой компьютерных архитектур  
и телекоммуникаций Западно-поморского  
технологического университета (Польша),  
доктор технических наук, профессор

**Игорь Анатольевич Шеремет**

заместитель директора Российского фонда  
фундаментальных исследований по науке,  
член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук, профессор

#### Редакционная коллегия

**Олег Николаевич Андрух**  
почетный работник науки и техники РФ,  
кандидат технических наук, доцент

**Борис Фёдорович Безродный**  
доктор технических наук, профессор

**Сергей Борисович Беркович**  
почетный геодезист РФ  
доктор технических наук, профессор

**Владимир Эрнестович Бородай**  
лауреат Государственной премии СССР,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

**Игорь Александрович Бугаков**  
заслуженный изобретатель РФ,  
почетный работник науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Вадим Геннадьевич Грибунин**  
почетный работник науки и техники РФ,  
доктор технических наук

**Сергей Григорьевич Данилюк**  
доктор технических наук, профессор

**Владимир Владимирович Зеленецкий**  
почетный работник науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Николай Николаевич Казаков**  
член Союза писателей России  
выпускающий редактор

**Олег Павлович Кузнецов**  
кандидат технических наук, доцент

**Александр Ильич Куприянов**  
доктор технических наук, профессор

**Анатолий Викторович Мазин**  
доктор технических наук, профессор

**Алексей Сергеевич Марков**  
доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

**Дмитрий Геннадьевич Митрофанов**  
заслуженный изобретатель РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Роман Леонидович Мусатов**  
кандидат технических наук  
заместитель главного редактора

**Игорь Николаевич Оков**  
доктор технических наук, профессор

**Владимир Петрович Пашинцев**  
заслуженный работник высшей школы РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**  
почетный работник науки и техники РФ,  
доктор технических наук, доцент

**Сергей Владимирович Смуров**  
почетный работник науки и техники РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Валерий Николаевич Умников**  
доктор технических наук, профессор

**Владимир Анатольевич Цимбал**  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Сергей Николаевич Шиманов**  
почетный работник высшего профессионального  
образования РФ, почетный радист РФ,  
доктор технических наук, профессор



#### **Александр Григорьевич Мурашов**

Вице-президент МОУ «ИИФ»,  
полковник запаса

#### **Дорогие друзья! Уважаемые коллеги!**

17 декабря в Вооруженных силах Российской Федерации отмечается День Ракетных войск стратегического назначения. РВСН – гордость нашей страны, нашего народа, нашей армии, основа национальной безопасности и обороноспособности государства. Этот род Вооруженных сил является важнейшей составляющей стратегических ядерных сил России и гарантом защиты национальных интересов страны. На солдатах и сержантах, прапорщиках, офицерах и генералах РВСН лежит громадная ответственность – от них зависит спокойствие на родной земле. Высочайший профессионализм, преданность воинскому долгу, присяге и Отечеству – главные слагаемые доблестной и почетной службы воинов-ракетчиков.

Может возникнуть вопрос: почему на страницах научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики», входящего в Перечень ВАК, я пишу про День Ракетных войск стратегического назначения? Ответ прост: 17 декабря для сотрудников Межрегионального общественного учреждения «Институт инженерной физики» особый праздник: военная служба многих из нас была непосредственно связана с РВСН. В семьях наших сотрудников в ракетных войсках служили и продолжают служить мужья и сыновья, отцы и деды, матери, жены и дочери.

А главное, что в 1993 году у истоков создания МОУ «ИИФ» стояли именно офицеры-ракетчики: ученые и преподаватели Серпуховского высшего военного командно-инженерного училища Ракетных войск имени Ленинского комсомола – в настоящее время филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого.

И они очень много сделали для развития современной науки, техники и укрепления обороноспособности нашей страны. Мы гордимся фундаментальными научными исследованиями и разработками бывших офицеров РВСН, а сейчас ведущих ученых – теоретиков и практиков – нашего Института! Нельзя не отметить их существенный вклад в решение задач астрономо-геодезического, навигационного и геоинформационного обеспечения, проблем создания защищенных телекоммуникационных информационно-аналитических систем, вопросов информационной безопасности и технологий ее обеспечения с использованием компьютерных, инструментальных и квантовых технологий обработки информации, вопросов системного анализа сложных технических систем и рисков их эксплуатации, проблем искусственного интеллекта и многих других актуальных и востребованных научных и научно-практических задач.

Приятно отметить – и в настоящее время продолжается неразрывная связь между РВСН и МОУ «ИИФ»! Десятки ветеранов-ракетчиков после прохождения военной службы находят достойное место в дружном, творческом и работоспособном коллективе нашего Института. И это не может не радовать!

С праздником, дорогие друзья, уважаемые коллеги и ветераны военной службы! С Днем Ракетных войск стратегического назначения – надежным партнером и кузницей кадров для Института инженерной физики! Крепкого вам здоровья, счастья, благополучия! Успехов в службе и труде на благо нашего Отечества – великой России!

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК: 53.023; 53.06; 159.953;  
514.8; 628.971; 628.972

## О СОВПАДЕНИИ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ПЕРИОДОВ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ С ПЕРИОДАМИ В ФЛУКТУАЦИЯХ ПРОЦЕССОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

## ON THE COINCIDENCE OF THE ROTATIONAL PERIODS OF BINARY PULSARAS WITH PERIODS IN VARIOUS PROCESSES FLUCTUATIONS

**Виктор Анатольевич Панчелюга**

кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
Институт теоретической и экспериментальной  
биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино,  
ул. Институтская, д. 3  
Тел.: +7(4967)73-92-62  
E-mail: victor.panchelyuga@gmail.com

**Мария Сергеевна Панчелюга**

научный сотрудник  
Институт теоретической и экспериментальной  
биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино,  
ул. Институтская, д. 3  
Тел.: +7(4967)73-92-62  
E-mail: www-maha@yandex.ru

**Вадим Николаевич Лесных**

младший научный сотрудник  
Институт теоретической и экспериментальной  
биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино, ул.  
Институтская, д. 3  
Тел.: +7(4967)73-92-62  
E-mail: 1253vadim@mail.ru

### Аннотация

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований флуктуаций в процессах различной природы с применением различных математических методов исследования шумоподобных временных рядов, которые привели к обнаружению единого спектра периодов для диапазона 1-120 мин. В настоящей работе показано существование данного спектра для диапазона 120-300 мин, а также его совпадение со спектром вращательных периодов двойных звездных систем. Ранее подобное совпадение было продемонстрировано Л.В. Грун-ской для временных рядов вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли.

**Ключевые слова:** локальный фрактальный анализ, альфа-распад, флуктуации температуры, двойные звездные системы, пульсары.

### Summary

Experimental studies of various processes fluctuations by different mathematical methods, which led to universal spectrum of periods for the range of 1-120 min, are considered. In the present paper, the existence of this spectrum for the range 120-300 min is shown, as well as its coincidence with the spectrum of rotational periods of binary pulsars. Earlier, L.V. Grunskaya demonstrated a similar coincidence for time series of the Earth's electric field vertical component.

**Keywords:** local fractal analysis, alpha decay, temperature fluctuations, binary pulsars.

### Введение

Как известно, флуктуации являются неотъемлемым атрибутом любого процесса природного или техногенного происхождения. Даже то, что принято рассматривать как эталон стабильности, например, процессы, лежащие в основе стандартов времени и частоты, также подвержены флуктуациям [1]. Принято считать, что такого рода флуктуации локально являются совершенно случайными, а глобально их свойства описываются функцией распределения. Тем не менее, развитие специальных методов локального анализа позволило выявить ряд закономерностей в таких, по общему мнению, совершенно случайных

временных рядах флуктуаций. Очевидно, одним из первых методов локального анализа является гистограммный метод [2], использование которого для исследования флуктуаций в различных процессах (радиоактивный распад, электронные шумы, химико-биологические системы) позволило получить ряд интересных результатов [3]. Дальнейшим развитием методов локального анализа можно считать локальный фрактальный анализ шумоподобных временных рядов методом всех сочетаний (МВС) [4]. Результат вычисления фрактальной размерности в МВС-методе инвариантен относительно тех же преобразований временного ряда (сдвиги, растяжения, зеркальные

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

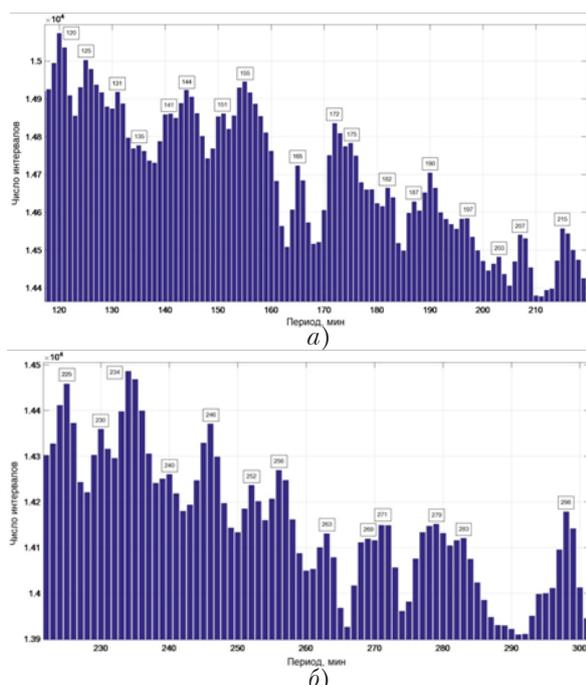
отражения и перемешивание отрезка временно-го ряда на основе которого вычисляется фрактальная размерность), что и результат экспертно-го сравнения в гистограммном методе [4].

МВС-анализ большого массива временных рядов флуктуаций скорости альфа-распада позволил выявить спектр периодов в диапазоне 1-120 мин [5], для которого было показано не только совпадение с периодами собственных колебаний Земли, но и его универсальный характер: периоды, найденные разными авторами, в флуктуациях процессов различной природы, всегда совпадали с периодами из найденного спектра [5]. В силу последнего свойства данный спектр был назван «универсальный спектр периодов» (УСП).

Свойство универсальности, впервые отмеченное в [5], было подтверждено дальнейшими исследованиями. УСП был найден в флуктуациях температуры мелких млекопитающих и птиц [6] в т.ч. с различным уровнем метаболизма [7]. Также было показано наличие УСП во временных рядах флуктуаций хемилюминесценции планарий [8].

### Исследования УСП в диапазоне 120-300 мин

Результаты, кратко рассмотренные выше, относятся к диапазону периодов 1-120 мин. В настоящей работе представлен дальнейший МВС-анализ 329-суточного массива флуктуаций скорости альфа-распада, использованного в [4], для исследования спектра периодов в диапазоне

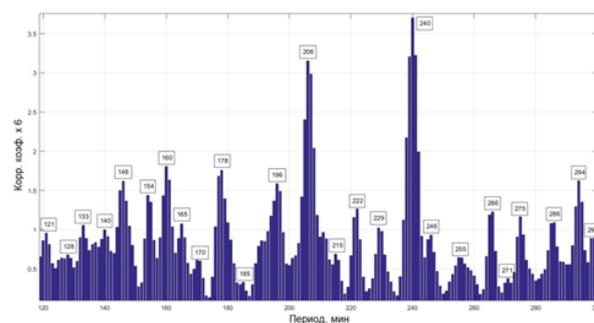


**Рис. 1.** Спектр периодов во временных рядах 1-секундных измерений флуктуаций скорости альфа-распада для диапазонов 120-220 мин а) и 220-300 мин б)

120-300 мин. Используя методику МВС-анализа, описанную в [3], был получен спектр, показанный на *рисунке 1*. Для наглядности диапазон 120-300 мин разбит на две части, которые представлены на *рисунках 1а и 1б*. Значения периодов приведены в прямоугольных рамках над соответствующими пиками.

В качестве второго проявления УСП рассмотрим спектр периодов, полученный в ходе измерений флуктуаций температуры мелких млекопитающих. Т.к. температура – сравнительно медленно изменяющийся параметр, то ее измерение чаще чем раз в минуту не имеет смысла. Низкое временное разрешение не позволяет использование МВС-анализа, т.к. в этом случае, отрезок данных, необходимый для вычисления фрактальной размерности, будет порядка 30 мин и «спектр» в 120-300-минутном диапазоне будет состоять всего из шести точек. Потому, для обнаружения УСП был разработан метод, основанный на использовании синхронных временных рядов флуктуаций температуры, полученных от разных животных.

Пары таких синхронных временных рядов разбивали на непересекающиеся отрезки длина которых изменялась от 10 до 300 мин с шагом в 1 мин. Отрезки почленно суммировались для каждого значения длины и вычислялся коэффициент корреляции между парами суммарных синхронных отрезков – получали вектор значений коэффициентов корреляции для 290 периодов суммирования. Описанная процедура повторялась для всех возможных пар синхронных временных рядов. После этого, полученные векторы коэффициентов корреляции почленно суммировали и результат сглаживали два раза методом скользящего среднего с использованием пуассоновского окна. Спектр, полученный с использованием описанной процедуры на основе четырех синхронных временных рядов, представлен на *рисунке 2*. Видно, что для некоторых периодов наблюдаются очень выраженные пики. Т.к. спектр (*рисунк 2*) не нормирован, то можно оценить величину коэффициента корреляции, учитывая, что для четырех временных



**Рис. 2.** Спектр периодов во временных рядах 1-минутных измерений флуктуаций температуры мелких млекопитающих в диапазоне периодов 120-300 мин

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

рядов возможно их шесть парных сочетаний.

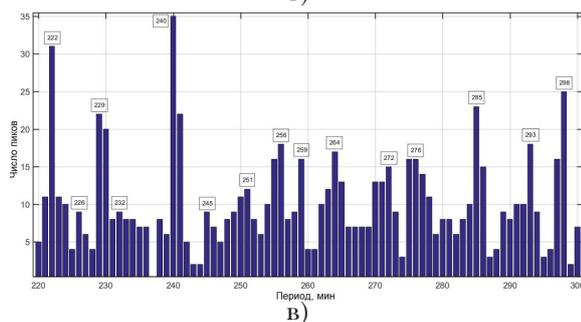
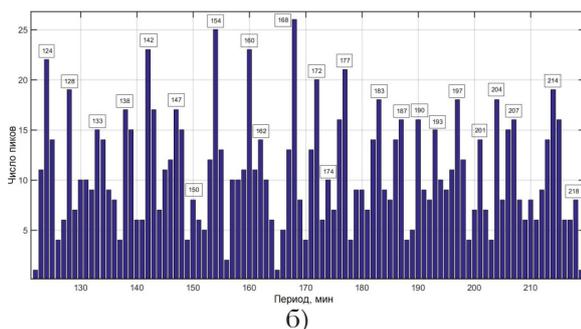
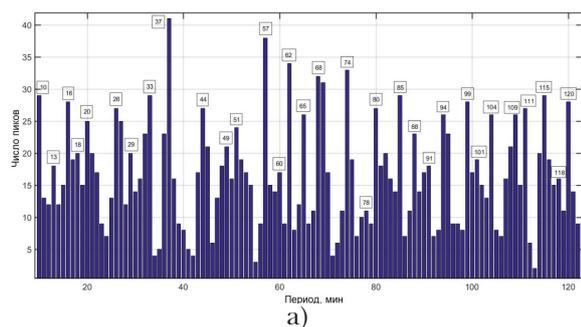
Необходимо отметить, что спектры, аналогичные показанным на *рисунках 1-2*, демонстрируют большую вариабельность амплитуд пиков. С учетом этого на *рисунке 3* приведены распределения частот встречаемости пиков, построенные на основе 1873 пиков, обнаруженных на спектрах, аналогичных показанному на *рисунке 2*. Учитывая, что точность определения пиков на представленных спектрах  $\pm 1$  мин, пики на спектрах (*рисунки 1-3*) можно считать совпадающими, если разность их значений  $\leq 2$ . С учетом этого, сравнение спектров на *рисунках 1 и 3* показывает, что только для пиков 144 мин (*рисунок 1*) и 147 мин (*рисунок 3*) эта разность  $> 2$  ( $=3$ ) и пик 165 мин (*рисунок 1*) отсутствует на *рисунке 3*. Остальные 29 пиков совпадают в пределах указанной точности. Следовательно, спектры, полученные с использованием существенно различных методов анализа, для флуктуаций скорости альфа-распада и для флуктуаций температуры млекопитающих можно считать совпадающими

и мы можем говорить о существовании УСП в диапазоне периодов 120-300 мин.

## УСП и орбитальные периоды двойных звездных систем

В работе [9] с использованием методики анализа собственных векторов ковариационных матриц [10] проанализированы временные ряды инфранизкочастотных вариаций вертикальной составляющей электрического поля в пограничном слое атмосферы Земли, регистрируемые в течение нескольких десятилетий на экспериментальном полигоне Владимирского университета, а также, параллельно, на ряде других полигонов. В результате были обнаружены некогерентные сложнопериодические компоненты, локализованные на частотах гравитационно-волнового воздействия, которые связаны с вращательными периодами двойных звездных систем, перечисленных в каталоге [11].

Рассмотрение каталога [11] позволило выявить 18 двойных звездных систем, орбитальные периоды которых не превышают 300 мин. Названия этих систем приведены во втором столбце *таблицы 1*. В третьем и четвертом столбцах приведены значения орбитальных периодов в днях и минутах, соответственно. Для сравне-



**Рис. 3.** Частоты встречаемости пиков на спектрах флуктуаций температуры мелких млекопитающих

**Таблица 1**

Орбитальные периоды двойных звездных систем в диапазоне до 300 мин и близкие им периоды УСП

№	Название	Двойные звезды [9]		УСП	
		Орбитальный период дни	мин	р/р (Рис.1)	Темп. (Рис.3)
1	J0024-7204R	0.0662	95.33	95 [4]	95
2	J1807-2459A	0.071092	102.37	99.8 [4]	101
3	B1744-24A J1748-2446A	0.075646111	108.93	106.3 [4]	109
4	J1518+0204C	0.087	125.28	125	124
5	J2051-0827	0.0991102506	142.72	141	142
6	J0737-3039A J0737-3039B	0.102251563	147.24	---	147
7	B0021-72J = J0023-7204J	0.1206649378	173.76	172	172
8	J0024-7204W	0.1330	191.52	190	193
9	J0024-7204O	0.135974305	195.8	196	197
10	B1908+00 J1910+0004	0.140996	203.03	203	204
11	J1701-3006B	0.1445454304	208.15	207	207
12	J0024-7204P	0.1472	211.97	---	210
13	J1701-3006E	0.16	230.4	230	230
14	J2140-2310A	0.17399	250.55	252	251
15	J1953+1846A	0.1766	254.3	256	256
16	J1744-3922	0.19	273.6	272	272
17	J1141-6545	0.1976509587	284.62	283	285
18	J1701-3006F	0.20	288	---	289

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ния в пятом и шестом столбцах даны значения периодов УСП, присутствующие на спектрах флуктуаций скорости радиоактивного распада (рисунк 1) и флуктуаций температуры мелких млекопитающих (рисунк 3). Периоды в строках 1-3 пятого столбца взяты из работы [4].

Используя критерий совпадения, рассмотренный выше, можно отметить, что практически для всех 18 случаев разность между значением орбитального периода (столбец 4 таблицы 1) и периодами УСП  $\leq 2$ . Только для двух периодов в флуктуациях альфа-распада, которые даны в строках 2 и 3 эта разность равна 2.57 и 2.63, также в радиоактивном распаде отсутствуют периоды в строках 6, 12 и 18. В то же время, для всех перечисленных случаев в спектре флуктуаций температуры имеются соответствующие периоды, отличие которых от орбитальных периодов  $\leq 2$ . В силу этого, можно считать, что орбитальные периоды двойных систем, приведенные в таблице 1, соответствуют периодам УСП.

### Заключение

Как отмечалось выше, в [4] было показано совпадение УСП со спектром собственных колебаний Земли. Это совпадение, долгое время, служило источником идей о возможном действующем агенте, который обуславливает появление УСП. В силу того, что собственные колебания Земли так или иначе модулируют многие процессы практически во всех геосферах – такая модуляция представлялась основой наблюдаемой универсальности УСП. Но, обнаружение Л.В. Грунской во временных рядах вертикальной составляющей электрического поля Земли периодов, связанных периодами вращения двойных систем [9-10], а также показанная выше связь орбитальных периодов с УСП, может свидетельствовать о присутствии УСП также в астрофизических системах и, следовательно, о возможном существовании агента космофизической природы, ответственного за формирование УСП.

В пользу такого предположения говорят также обнаруженные ранее совпадения УСП с периодами, найденными в спектрах астрофизических мазеров [12], а также с вращательными периодами астероидов [13]. Дальнейшее изучение астрофизической проявленности УСП является целью наших последующих работ.

### Литература

1. Панчелюга В.А., Панчелюга М.С., Лесных В.Н. О влиянии мощных нестационарных процессов на параметры стандартов времени и частоты // Известия Института инженерной физики, 2019. №4(54). С.7-15.

2. Шноль С.Э., Панчелюга В.А. Феномен макроскопических флуктуаций. Методика измерений и обработки экспериментальных данных // Мир измерений, 2007. №6. С. 49-55.

3. Шноль С.Э. Космофизические факторы в случайных процессах. Стокгольм: Шведский физический архив, 2009. 358с.

4. Панчелюга В.А., Панчелюга М.С. Фрактальная размерность и гистограммный метод: методика и некоторые предварительные результаты анализа шумоподобных временных рядов // Биофизика, 2013. Т. 58. Вып. 2. С. 377-384.

5. Панчелюга В.А., Панчелюга М.С. Локальный фрактальный анализ шумоподобных временных рядов методом всех сочетаний в диапазоне периодов 1-115 мин // Биофизика, 2015. Т. 60. Вып. 2. С. 395-410.

6. Диатроптов М.Е., Панчелюга В.А., Панчелюга М.С. Динамика температуры тела у мелких млекопитающих и птиц в 10-120-минутном диапазоне периодов // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины, 2020. Т.169. №6. С.706-711.

7. Диатроптов М.Е., Панчелюга В.А., Панчелюга М.С., Суоров А.В. Околочасовые ритмы температуры тела у млекопитающих и птиц с разным уровнем обмена веществ // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни, 2020. Т. 494. №1. С.472-476.

8. Panchelyuga V.A., Tiras Kh.P., Novikov K.N., Panchelyuga M.S., Nefedova S.E., Seraya O.Yu. On universal nature of periods spectrum in time series of planaria chemiluminescence // CEUR Workshop Proceedings, Vol.2763. Pp. 61-63.

9. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Сушкова Л.Т. Выявление спектрально локализованных компонент на частотах астрофизических процессов во временных рядах вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия, 2014. Вып.2. С.54-71.

10. Грунская Л.В., Батин А.С., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Сушкова Л.Т. О чувствительности метода собственных векторов при анализе временных рядов // Известия Института инженерной физики, 2011. №4 (22). С.48-55.

11. W.R. Johnston List of pulsars in binary systems <http://www.johnstonsarchive.net/relativity/binpulsstable.html>

12. Панчелюга В.А., Владимирский Б.М., Панчелюга М.С. О совпадении спектра периодов во временных рядах флуктуаций скорости альфа-распада с периодическими компонентами в спектрах астрофизических мазеров // Система «Планета Земля», М.: ЛЕНАНД, 2019. С.115-118.

13. Панчелюга В.А., Панчелюга М.С. О совпадении спектра периодов в флуктуациях скорости альфа-распада со спектром вращательных периодов астероидов // Материалы XV Международной конференции «Финслеровы обобщения теории относительности» (FERT-2019). М.: 11-й формат, 2019. С.27-29.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.391

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВХОДНОГО ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ АНАЛОГО- ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

## SOME ASPECTS OF CALCULATING THE PARAMETERS OF THE INPUT LOW-PASS FILTER OF AN ANALOG- TO-DIGITAL CONVERTER

**Владимир Александрович Смирнов**

кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры «Приборы и биотехнические системы»  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Адрес: 300012 г. Тула, проспект Ленина, д. 92  
Тел. +7 (4872) 35-05-52  
E-mail: veld071@rambler.ru

**Алексей Олегович Макалов**

аспирант кафедры  
«Приборы и биотехнические системы»  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»  
Адрес: 300012 г. Тула, проспект Ленина, д. 92  
Тел. +7 (4872) 35-05-52  
E-mail: aleks.makalu@outlook.com

### Аннотация

Предложен подход к расчету параметров входного фильтра низких частот в зависимости от разрядности и частоты дискретизации АЦП для достижения максимального динамического диапазона. Приведены примеры расчета входного фильтра АЦП. Особое внимание уделено проблеме выбора порядка ФНЧ в акустических аналого-цифровых приложениях.

**Ключевые слова:** аналого-цифровой преобразователь, фильтр нижних частот, аналого-цифровая система, динамический диапазон.

### Summary

An approach to calculating the parameters of the input low-pass filter depending on the capacity and sampling frequency of the ADC is proposed to achieve the maximum dynamic range. Examples of calculating the ADC input filter are given. Particular attention is paid to the problem of choosing the order of the low-pass filter in acoustic analog-digital applications.

**Keywords:** analog-to-digital converter, low-pass filter, analog-to-digital system, dynamic range.

### Введение

На сегодняшний день аналого-цифровые преобразователи (АЦП) являются неотъемлемой частью измерительных устройств. Современные АЦП с разрядностью от 16 до 24 бит обладают хорошей стабильностью параметров и могут обеспечить высокую точность представления сигнала, однако при работе с ними необходимо учитывать дискретный характер их работы. Эффект наложения спектров давно и хорошо известен, поэтому для исключения влияния эффектов дискретизации по времени спектр входного сигнала АЦП необходимо ограничивать при помощи аналогового фильтра низких частот (ФНЧ) на входе АЦП. Несмотря на широкую известность данного факта [1] авторам неизвестны работы, в которых подробно и обоснованно рассмотрен расчет входного фильтра АЦП.

В статье предлагается подход к расчету параметров входного фильтра низких частот в зависимости от разрядности и частоты дискретизации АЦП для полного использования возможностей АЦП.

### Основная часть

На *рисунке 1* представлена обобщенная структурная схема входного тракта аналого-цифровой системы.

Примем передаточную функцию входного ФНЧ в виде:

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{(Tp+1)^k} \quad (1)$$

где  $T$  – постоянная времени фильтра нижних частот;

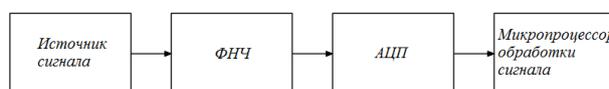
$k$  – порядок фильтра.

Запишем амплитудно-частотную характеристику фильтра:

$$|W_{\Phi}(f)| = \frac{1}{(4\pi^2 T^2 f^2 + 1)^{\frac{k}{2}}} \quad (2)$$

где  $f$  – частота.

Чтобы полностью исключить эффект наложения спектра, на частоте, равной половине частоты



**Рис. 1.** Структурная схема аналого-цифровой системы

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ты дискретизации АЦП, фильтр должен подавлять входной сигнал максимально допустимой амплитуды до уровня нескольких младших разрядов АЦП:

$$\frac{1}{(\pi^2 T^2 f_d^2 + 1)^{\frac{k}{2}}} \leq \frac{A_3}{2^n}, \quad (3)$$

где  $n$  – разрядность АЦП;

$A_3$  – допустимый уровень шума в единицах младшего разряда.

Преобразуя, найдем:

$$(\pi^2 T^2 f_d^2 + 1)^{\frac{k}{2}} \geq \frac{2^n}{A_3}. \quad (4)$$

С другой стороны, чтобы исключить искажения сигнала в полосе пропускания, необходимо выполнение условия, аналогичного (4):

$$1 - \frac{1}{(4\pi^2 T^2 f_n^2 + 1)^{\frac{k}{2}}} \leq \frac{A_n}{2^n}, \quad (5)$$

где  $f_n$  – полоса пропускания системы;

$A_n$  – допустимый уровень падения АЧХ в полосе пропускания в единицах младшего разряда.

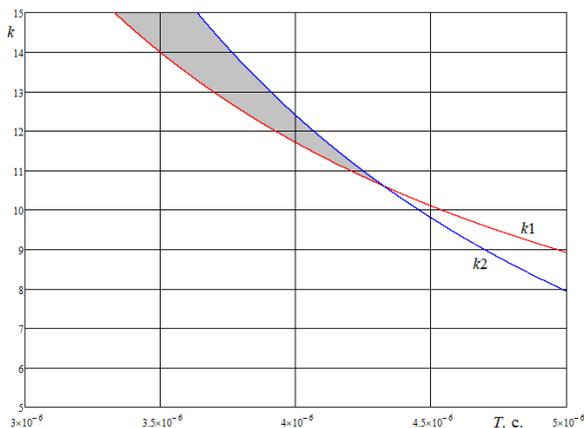
Преобразуя (5), получим:

$$(4\pi^2 T^2 f_n^2 + 1)^{\frac{k}{2}} \leq \frac{2^n}{2^n - A_n}, \quad (6)$$

При проектировании аналого-цифровых систем, как правило, задаются требуемая разрядность АЦП  $n$  и полоса пропускания  $f_n$ , из технических возможностей задается частота дискретизации АЦП. На основании указанных параметров по формулам (5) и (7) рассчитываются параметры фильтра – порядок и постоянная времени. Для определения указанных параметров выразим порядок фильтра из неравенств (4) и (6):

$$k \geq \frac{\log \frac{2^{2n}}{A_3^2}}{\log(\pi^2 T^2 f_d^2 + 1)}, \quad (7)$$

$$k \leq \frac{\log \frac{2^{2n}}{(2^n - A_n)^2}}{\log(4\pi^2 T^2 f_n^2 + 1)}. \quad (8)$$



**Рис. 2.** Графоаналитический расчет входного фильтра АЦП. Серым цветом выделена область допустимых значений параметров фильтра

Из графиков зависимости  $k(T)$  определяется минимальный порядок фильтра и его постоянная времени. Также построение графиков по неравенствам (7), (8) позволяет определить, разрешима ли поставленная задача при заданных параметрах.

На рисунке 2 показаны соответствующие графики для следующих параметров:

- частота выборок АЦП  $f_d = 100$  кГц;
- требуемая полоса пропускания системы  $f_n = 1$  кГц;
- разрядность АЦП  $n = 10$ ,  $A_3 = AP = 4$ .

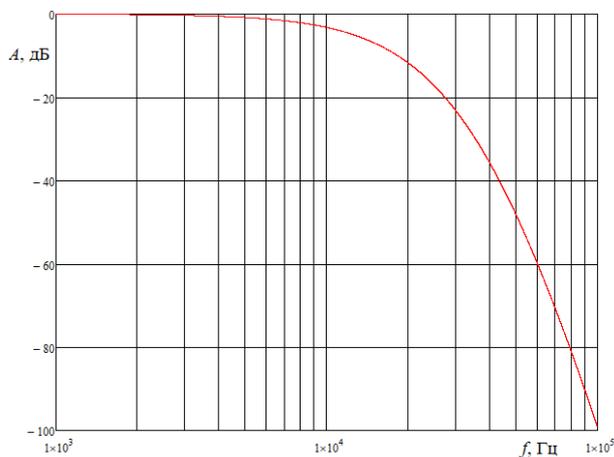
Из рисунка 2 следует, что при заданных параметрах АЦП минимальный порядок фильтра должен быть 11. При этом постоянная времени  $T = 4,2 \cdot 10^{-6}$  с. На рисунке 3 приведена АЧХ полученного в результате расчета фильтра. Как следует из полученной АЧХ, на частоте 1000 Гц (верхняя граница полосы пропускания) подавление сигнала составляет 0,033 дБ, на частоте 50000 Гц (начало полосы задерживания) подавление сигнала составляет 48 дБ. Полученные значения соответствуют исходным требованиям:

$$20 \log \frac{A_3}{2^n} = -48 \text{ дБ};$$

$$20 \log \left( 1 - \frac{A_n}{2^n} \right) = -0,034 \text{ дБ}.$$

Рассмотренный пример показывает, что проблема построения входного фильтра является весьма актуальной, поскольку даже при достаточно рядовых параметрах АЦП и невысоких требованиях к шумам порядок фильтра получается очень большим и реализация такого фильтра оказывается достаточно громоздкой даже при современной элементной базе.

При проектировании аналого-цифровой части системы разработчики применяют значения динамического диапазона и допустимого уровня падения АЧХ в полосе пропускания, выраженные в децибелах. Для удобства применения, не-



**Рис. 3.** АЧХ полученного фильтра

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

равенства (7) и (8) выражены в следующем виде:

$$k \geq \frac{N_d}{10 \log(\pi^2 T^2 f_d^2 + 1)}, \quad (9)$$

$$k \leq \frac{N_n}{10 \log(4\pi^2 T^2 f_n^2 + 1)}, \quad (10)$$

где  $N_d$  – динамический диапазон аналого-цифровой части системы в дБ;

$N_n$  – допустимый уровень падения АЧХ в полосе пропускания в дБ.

В акустических аналого-цифровых приложениях предъявляются высокие требования к аналогово-цифровой части. Так уровень эквивалентного звукового давления, обусловленного собственным шумом, и уровень предельного звукового давления для конденсаторного микрофона группы сложности 0 составляют 20 дБ и 130 дБ соответственно [2]. Динамический диапазон определяется по следующей формуле [3]:

$$N_d = L_n - L_{ш}, \quad (11)$$

где  $N_d$  – динамический диапазон микрофона в дБ;

$L_n = 130$  дБ – уровень предельного звукового давления;

$L_{ш} = 20$  дБ – уровень эквивалентного звукового давления, обусловленного собственным шумом.

В соответствии с (11) динамический диапазон аналого-цифровой системы для конденсаторного микрофона должен составлять:

$$N_d \geq 110 \text{ дБ.}$$

Для достижения данного динамического диапазона потребуется АЦП с разрядностью не менее 19 двоичных разрядов.

Уровень падения АЧХ микрофонного усилителя составляет не более 0,5 дБ на частоте 20 кГц [3]:

$$N_n \leq 0,5 \text{ дБ.}$$

Максимальная частота дискретизации АЦП, используемого в приложениях аудиотехники, составляет 768 кГц.

Для параметров  $N_n = 0,5$  дБ,  $N_d = 110$  дБ,  $f_d = 768$  кГц,  $f_n = 20$  кГц при решении (9) и (10) порядок фильтра должен составлять 27. При этом постоянная времени  $T = 5,2 \cdot 10^{-7}$  с. Полученные результаты показывают, что в приложениях аудиотехники для фильтра АЦП предъявляются высокие требования, которые приводят к увели-

чению количества элементов аналого-цифровой части системы.

### Заключение

Следует отметить, что несоблюдение полученных критериев не всегда приводит к существенному искажению преобразуемого АЦП сигнала. В случае, если спектр входного сигнала изначально является ограниченным, можно ограничиться простейшим фильтром первого порядка для фильтрации самой высокочастотной составляющей шумового спектра, которая имеет малую амплитуду. Фильтр высокого порядка необходим в случае, если на вход аналого-цифровой системы поступает широкополосный сигнал большой амплитуды (например, если система должна работать в сложной помеховой обстановке).

На сегодняшний день получили распространение дельта-сигма АЦП, физика работы которых обеспечивает осреднение входного сигнала на значительном числе выборок, что во многом снижает остроту проблемы наложения спектров. Но данный вид АЦП обладает высокой задержкой сигнала, что не позволяет их использовать в ряде приложений.

Предложенная в работе методика позволяет рассчитать входной фильтр АЦП в тех случаях, где требуется максимально полное использование динамического диапазона АЦП. Результаты применимы при разработке широкополосных аналого-цифровых систем с использованием быстросрабатывающих АЦП поразрядного уравнивания и параллельных АЦП.

### Литература

1. Топильский В.Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей. Учебное издание. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. 288 с.
2. ГОСТ Р 53566-2009. Микрофоны. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 9 с.
3. ГОСТ Р 53576-2009 (МЭК 60268-4:2004) Микрофоны. Методы измерения электроакустических параметров (Переиздание). М.: Стандартинформ, 2020. 45 с.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 629.7

## ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В МИРНОЕ И ВОЕННОЕ ВРЕМЯ

## JUSTIFICATION OF THE STRUCTURE OF A DUAL-USE SPACECRAFT IN PEACETIME AND WARTIME

**Владимир Леонидович Захаров**

*доктор военных наук, профессор  
действительный член АВН*

профессор кафедры  
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)  
Адрес: 125993, Москва,  
Волоколамское шоссе, д. 4  
Тел.: +7 (905) 566-17-94  
E-mail: varahas@yandex.ru

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**

*почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, доцент*

*действительный член АИИ*  
профессор кафедры  
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)  
Первый Вице-президент Института –  
заместитель Председателя Правления Института  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: dv\_smr@iifmail.ru

**Рафаэль Рамисович Казаков**

*кандидат технических наук*

доцент кафедры  
«Бортовых информационных и измерительных  
комплексов космических аппаратов»  
ВКА имени А.Ф. Можайского

Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (911) 223-59-67  
E-mail: xoxlov1984@bk.ru

**Виктор Александрович Сергеев**

*кандидат технических наук, доцент*

доцент кафедры  
«Бортовых информационных и измерительных  
комплексов космических аппаратов»  
ВКА имени А.Ф. Можайского

Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (904) 514-10-15  
E-mail: xoxlov1984@bk.ru

### Аннотация

В статье рассмотрены особенности использования космических аппаратов двойного назначения. Предложена структура системы управления таких аппаратов. Рассмотрены особенности и трудности построения перспективных разработок.

**Ключевые слова:** космический аппарат двойного назначения, околоземное космическое пространство, система управления, космический мусор, орбитальная группировка.

### Summary

The article discusses the features of using dual-purpose spacecraft. The structure of the control system of such devices is proposed. The features and difficulties of constructing promising developments are considered.

**Keywords:** dual-purpose spacecraft, near-earth space, control system, space debris, orbital constellation.

### Введение

Развитие технологического процесса тесно связано с активным освоением околоземного космического пространства (ОКП). Гонка вооружений космической отрасли неизменно ведет к появлению все новых государств, способных решать научные, исследовательские и другие задачи, путем выведения на орбиту Земли космических аппаратов (КА).

Это привело к тому, что в ОКП в настоящее время расположено более 41000 космических объектов (КО) и несколько миллионов частиц различного размера – космического мусора (КМ) [1]. Все это множество объектов в ОКП образуется в результате выхода из строя или выработки срока активного существования КА. К КМ

так же можно отнести остатки отработавших ступеней ракет-носителей и разгонных блоков, используемых для выведения КА различного назначения.

Все объекты антропогенного характера в ОКП представляют серьезную опасность для КА и, в частности, для орбитальных космических станций [1]. Проблема КМ в ОКП в настоящее время является наиболее актуальной, так как сфера военно-политических разногласий крупнейших государств все больше смещается в космос.

Ввиду все большей вероятности столкновения запускаемых КА с КМ происходит активное наращивание орбитальных группировок (ОГ) малых КА. В настоящее время планируется создание ОГ малых КА для решения исследовательских задач.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

В результате возникает противоречие – наращивание ОГ КА при ограничениях на запуски КА, ввиду серьезного загрязнения ОКП. Одним из способов решения такого рода задач могут выступить КА – двойного назначения (КА ДН).

## Особенности использования космического аппарата двойного назначения

КА ДН – космический аппарат, особенности структуры и системы управления (СУ) которого позволяют использовать его в различных условиях обстановки. При этом направление решаемых задач могут кардинально отличаться друг от друга.

Предлагается разработать структуру КА который в мирное время способен бороться с КМ, а в случае начала боевых действий – бороться с вражескими КА. Для решения такой задачи подойдет так называемый КА-буксир, имеющий с одной из сторон жесткий трос с манипулятором на конце. При наличии достаточного запаса рабочего тела такой КА способен вывести с активной орбиты в мирное время КМ и КО, а в военное – вражеский КА. Однако наряду с плюсами использования такого рода КА, есть ряд серьезных проблем, усложняющих их разработку:

- далеко не всегда применение определенной целевой аппаратуры позволит в полном объеме выполнять задачи, возлагаемые заказчиками (ФКА, МО РФ, НИИ и др.) на КА;

- технический ресурс бортовой целевой аппаратуры не всегда может позволить осуществление передачи данных различным потребителям, а использование дополнительной – в свою очередь приводит к усложнению системы управления КА и увеличению его массы, а также стоимости. Это приведет к увеличению времени развертывания ОГ КА.

Решение рассмотренных выше проблем возможно при условии оптимизации СУ КА ДН. Для создания таких КА целесообразно использование особой структуры и компоновки КА.

## Система управления космического аппарата двойного назначения

При проектировании любой СУ КА характерно ее разбиение на отдельные взаимодействующие подсистемы (узлы), аналогично методикам, используемым в системном анализе.

Структура КА ДН в зависимости от возлагаемых на нее функций различна, однако можно выделить ряд составных частей, которые будут неизменны практически во всех случаях [2].

Структурная схема КА ДН представлена на рисунке 1.

Помимо рассмотренных выше систем необходимо обеспечить КА ДН качественной защитой корпуса и находящихся в нем вычислительных устройств в случае решения задач вблизи облака мелких или крупных частиц в ОКП.

Основные функции управления КА ДН осуществляет бортовой комплекс управления, который за счет совместной работы других, входящих в него систем управления посредством обратной связи также позволяет производить контроль параметров системы. Питание всех систем осуществляется посредством системы энергоснабжения. Все составные части КА ДН размещены в корпусе, в зависимости от решаемых КА задач, который можно дополнительно усилить для защиты.

Корректировка КА на орбите возможна за счет использования органов управления движением. Срок активного существования такого КА будет определять выбранной для решения задач орбитой, целевой аппаратурой и запасом объема рабочего тела.

## Основные аспекты применения космического аппарата двойного назначения в современных условиях

Основная функция КА ДН – борьба с КМ и КО. Такой КА при помощи манипулятора должен быть способен присоединиться к требу-

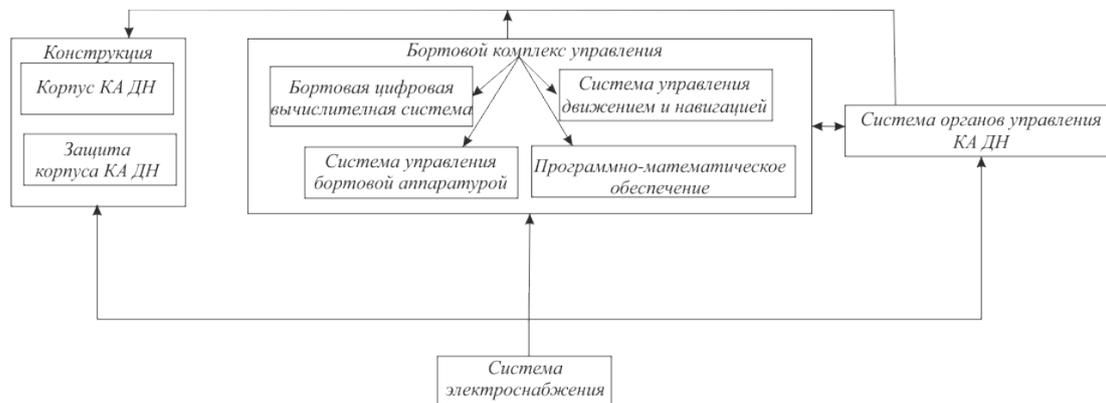


Рис. 1. Структурная схема КА ДН

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

тому объекту в ОКП и вывести его с орбиты (рисунки 2). Данная методика дает возможность в случае возникновения вероятности столкновения крупных частиц с орбитальной станцией или другим не менее важным КА, вывести эти частицы или КМ из потенциальной зоны столкновения, после чего отсоединиться от КМ и вернуться на целевую орбиту (если позволит запас рабочего тела). Тот же алгоритм применим для выведения вражеского КА из зоны его влияния и перевод на не целевую орбиту.

Для оперативного решения таких задач необходимо на орбите иметь достаточное количество КА ДН. ОГ таких КА должны рассчитываться в зависимости от возлагаемых на них задач [3]. В качестве базового КА целесообразно использовать малые КА, что позволит уменьшить время развертывания требуемой ОГ, за счет одновременного запуска нескольких КА ДН. Примерный внешний вид перспективного КА ДН представлен на рисунке 2.

Подобный подход уже используется при проектировании космических аппаратов для борьбы с КМ. Швейцарский центр космических исследований разработал КА Clean space one (рисунки 3) запуск которого планировался на 2017 год, однако пока так и остался на уровне проекта. Исследования продолжаются и в ближайшие годы планируется осуществление его запуска.

Изображения КА Clean space one представлены на рисунке 3.



Рис. 2. Внешний вид КА ДН

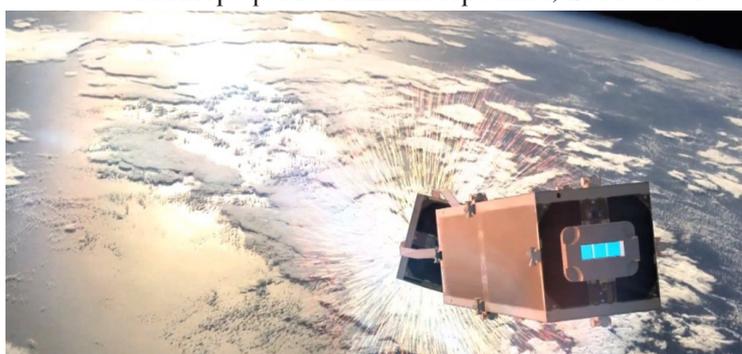


Рис. 3. Внешний вид КА Clean space one

### Заключение

В настоящее время все больше КА стараются использовать как аппараты двойного назначения. Применение КА для борьбы с КМ и КО является наиболее актуальным направлением ввиду того, что в ОКП ежегодно увеличивается число активных и неактивных КА и их обломков. При создании таких КА, которые будут способны выполнить задачу по выводу КМ с активной орбиты вернуться в заданную область космического пространства, скорость развертывания ОГ, требуемой для решения схожих задач в военное время, значительно уменьшится.

Однако есть ряд вопросов, одним из которых является возможность дозаправки КА ДН, что позволит увеличить срок активного существования таких КА, а также обеспечит необходимое количество рабочего тела для решения схожих задач неоднократно.

Так же немаловажным является вопрос формирования требований к точности выведения ОГ КА ДН в область ОКП, которая позволит с минимальным расходом рабочего тела обеспечить выполнение целевых задач всеми КА. Для определения такой области необходимо решить задачу параметрического синтеза, что требует проведения дополнительных исследований и выходит за рамки данной тематики.

### Литература

1. Казаков Р.Р., Мингалиев Э.Р. Анализ влияния космического мусора на безопасность космических полетов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, 2015. №3(127). С.77-87.
2. Баллистика и навигация космических аппаратов: учебник для вузов / Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко. 3-е изд. Перераб. и доп. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. 523 с.
3. Меньшиков В. А., Перминов А. Н., Рембеза А. И., Урличич Ю. М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014. 736 с.

УДК 621.398.8

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ С ПЕРЕМЕЖЕНИЕМ КОДОВЫХ КОМБИНАЦИЙ И КОДОВЫМ УПЛОТНЕНИЕМ ДАННЫХ

## MATHEMATICAL MODEL OF A NOISE- RESISTANT TRANSMISSION SYSTEM WITH THE INTERLEAVING OF CODE COMBINATIONS AND CODE COMPACTION OF DATA

**Владимир Владимирович Зеленецкий**  
*почетный работник науки и техники РФ*  
*доктор технических наук, профессор*  
профессор кафедры  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8 (905) 548-48-54  
E-mail: Zelenevsky.Vladimir@gmail.com

**Максим Сергеевич Черноусов**  
адъюнкт  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: +7 (920) 093-65-12  
E-mail: chernousov.m@mail.ru

**Юрий Владимирович Зеленецкий**  
*доктор технических наук, доцент*  
научный сотрудник  
ВА РВСН имени Петра Великого  
Адрес: 143900, Московская обл.,  
г. Балашиха, ул. Карбышева, д.8  
Тел.: +7 (903) 721-12-61  
E-mail: sys1434@mail.ru

**Владислав Владимирович Егоров**  
научный сотрудник  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

**Андрей Борисович Наконечный**  
аспирант  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

### Аннотация

В статье представлена структурная схема помехоустойчивой системы передачи данных, реализующая новую платформу каскадного кодирования данных. Для повышения помехоустойчивости и увеличения длины пакета исправляемых двоичных символов предлагается использовать оптимальный двоичный блочный код, перемежение кодовых комбинаций, глубина которого связана с длиной ортогональных сигналов Уолша-Адамара, кодовое уплотнение данных ортогональными последовательностями, скремблирование модулированного сигнала псевдослучайными последовательностями. Проведена оценка помехоустойчивости системы передачи данных в условиях воздействия различных помех.

**Ключевые слова:** перемежение – деперемежение кодовых комбинаций, оптимальный блочный двоичный код, кодовое уплотнение, скремблирование сигнала, псевдослучайная последовательность, гармоническая помеха, импульсная прерывистая помеха, вероятность битовой ошибки.

### Summary

The article presents a block diagram of a noise-resistant data transmission system that implements a new platform for cascading data encoding. To increase noise immunity and increase the length of the packet of corrected binary symbols, it is proposed to use an optimal binary block code, interleaving of code combinations, the depth of which is related to the length of orthogonal Walsh-Hadamard signals, code compaction of data with orthogonal sequences, scrambling of the modulated signal with pseudo-random sequences. An assessment of the noise immunity of the data transmission system under the influence of various interference was carried out.

**Keywords:** interleaving – de-interleaving of code combinations, optimal block binary code, code compaction, signal scrambling, pseudo-random sequence, harmonic interference, pulse intermittent interference, bit error probability.

Известные платформы каскадного кодирования в системах передачи данных (СПД) используются в качестве кода первой ступени (внешнего кода) недвоичные коды Рида-Соломона [1,3,4].

При этом основание кода Рида-Соломона  $q \leq 256$ , т.е. кодовый недвоичный символ содержит  $m = \log_2 q$  бит.

Недвоичные коды Рида-Соломона с основанием  $q = 512, 1024, 2048$  и т.д. построить можно, но декодировать их в реальном масштабе времени невозможно.

В то же время при использовании кодового уплотнения данных возникает необходимость передавать блок данных с длиной  $m = \log_2 q$ . В этом случае удастся значительно увеличить энергию кодового символа и повысить помехоустойчивость СПД.

Цель статьи – разработать платформу каскадного кодирования данных для исправления пакетов ошибок без применения недвоичных кодов Рида-Соломона, использующую кодовое уплотнение данных и обеспечивающую помехоустойчивость СПД в пределах теоретического предела К.Шеннона.

Структурная схема СПД представлена на рисунке 1.

Данные в виде двоичной последовательности поступают на информационный вход кодирующего устройства (КУ), которое генерирует двоичные блочные кодовые комбинации  $(n, k, d_{min})$  где  $n$  – длина кода,  $k$  – число информационных символов,  $d_{min}$  – минимальное кодовое расстояние. Коммутатор К1 распределяет кодовые

комбинации в перемежителе (запоминающем устройстве) таким образом, чтобы одноименные разряды всех  $m$  кодовых комбинаций ( $m$  – глубина перемежения) образовали  $m$ -разрядный столбец. Коммутатор К2 считывает столбцы одноименных разрядов поочередно и подает их на вход регистра сдвига RG1, который преобразует последовательный  $m$ -разрядный двоичный код столбца в параллельный.

Блок кодового уплотнения данных (БКУД) совместно с генератором последовательностей Уолша-Адамара  $Wal_m(t)$  на своем выходе формирует  $m$ -разрядный многоуровневый групповой сигнал, ширина спектра которого не отличается от спектра двоичного сигнала с выхода RG1 [2].

Блок модуляторов (БМ) совместно с генератором гармонического колебания  $\Gamma$  осуществляет фазовую модуляцию гармонического колебания по закону изменения амплитуды группового сигнала и рандомизацию выходного модулированного сигнала по закону псевдослучайной последовательности (ПСП), генерируемой генератором ГПСП [5].

Длина ПСП ( $B$ ) может быть равна  $m$ , т.е.  $B = m$ , в этом случае расширение спектра выходного сигнала БМ отсутствует, и может быть  $B > m$ , в этом случае спектр выходного сигнала БМ расширяется в  $K_s$  раз, где  $K_s = B/m$ .

В радиолинии на передаваемый сигнал действует аддитивная помеха (аддитивный белый гауссовский шум, стационарная помеха, импульсная помеха).

На приемной стороне блок демодуляции

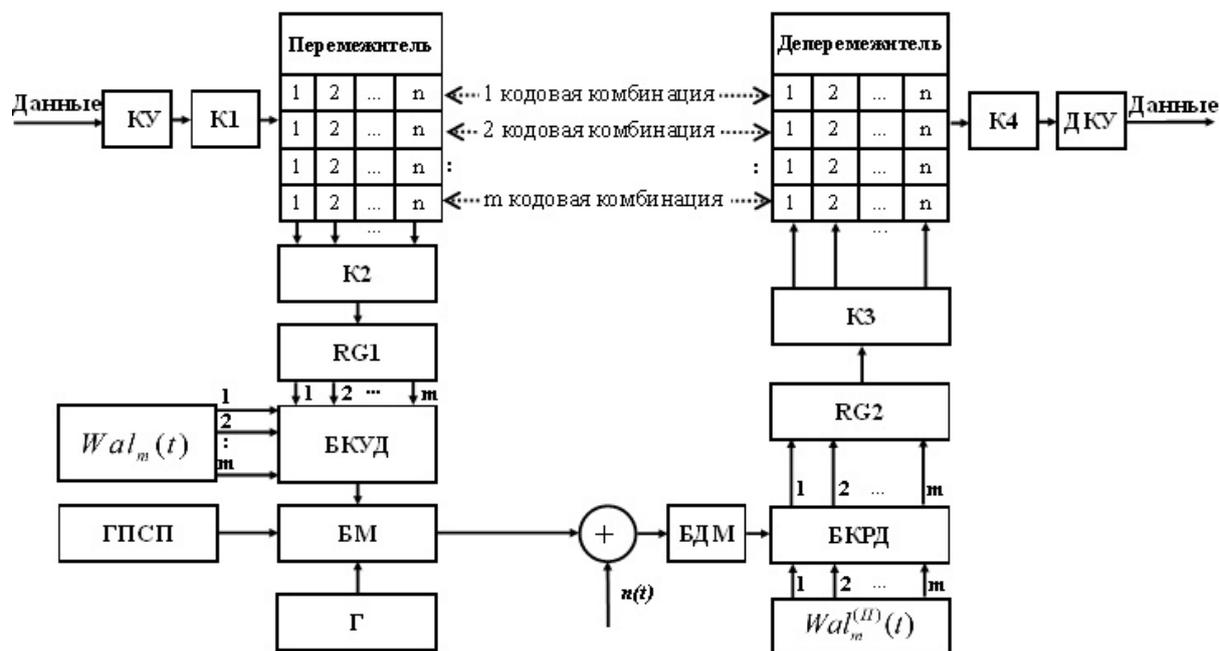


Рис. 1. Структурная схема СПД

сигнала (БДМ) выделяет групповой сигнал [5], а блок кодового разделения данных (БКРД) совместно с генератором полярных последовательностей Уолша-Адамара  $Wal_m^{(n)}(t)$  выделяет  $m$ -разрядный двоичный столбец одноименных символов переданных кодовых комбинаций [1], который с помощью регистра сдвига RG2 преобразуется в последовательный двоичный код. Коммутатор K3 распределяет принятые столбцы одноименных разрядов кодовых комбинаций в ячейки памяти деперемежителя, а коммутатор K4 считывает кодовые строки (комбинации) с выхода деперемежителя и передает их в декодирующее устройство (ДКУ) для выделения принятой информационной последовательности данных.

Выберем длину двоичного кода  $n=127$ . Тогда при глубине перемежения  $m=8$  запоминающее устройство перемежителя и деперемежителя будет содержать  $127 \times 8 = 1016$  ячеек памяти, при  $m=16$  число ячеек памяти составит 2032, что вполне реализуемо на практике.

Определим оптимальные параметры кода, имеющего длину  $n=127$ , по критерию

$$\max_{\frac{k}{n} P_0} \text{ при } P_b = \text{const},$$

где вероятность битовой ошибки на выходе декодера  $P_b$  равна

$$P_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_n^i P_0^i (1-P_0)^{n-i},$$

$P_0$  – вероятность ошибочного приема двоичного символа на входе декодера;

$t_{II}$  – число ошибок, исправляемых кодом.

Выберем группу известных двоичных блочных циклических кодов ( $n, k, d_{\min}$ ) с параметрами  $(127, 43, 29, t_{II} = \lfloor \frac{d_{\min}-1}{2} \rfloor = 14)$ ,  $(127, 50, 27, t_{II} = 13)$ ,  $(127, 57, 23, t_{II} = 11)$  [1] и определим значения показателя  $\frac{k}{n} P_0$  при  $P_b = 10^{-3}; 10^{-7}$ .

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Анализ таблицы 1 показывает:

**Таблица 1**  
Оценки  $\frac{k}{n} P_0$  при  $P_b = \text{const}$

Параметры кодов	$P_b$	$P_0$	$\frac{k}{n} P_0$ , дБ
$(127, 43, 29, t_{II} = 14)$	$10^{-3}$	0,05916	-16,983
	$10^{-7}$	0,02535	-20,664
$(127, 50, 27, t_{II} = 13)$	$10^{-3}$	0,05359	-16,728
	$10^{-7}$	0,02208	-20,608
$(127, 57, 23, t_{II} = 11)$	$10^{-3}$	0,044056	-17,04
	$10^{-7}$	0,015996	-21,44

- с уменьшением скорости кода  $\frac{k}{n}$  значение вероятности  $P_0$  для заданных требований по помехоустойчивости (вероятности  $P_b$ ) увеличивается, однако при этом требуется более широкая полоса пропускания;

- среди исследованных кодов существует оптимальный код с параметрами  $(127, 50, 27, t_{II}=13)$ , у которого показатель  $\frac{k}{n} P_0$  максимальный.

Определим зависимость  $P_0$  (таблица 1) от глубины перемежения  $m$ , битового отношения сигнал/шум  $h_b^2$ , отношения мощностей преднамеренной помехи и полезного сигнала, базы сигнала  $B$ .

## 1. Помеха представлена аддитивным белым гауссовским шумом

В этом случае вероятность  $P_0$  определяется выражением

$$P_0 = 0,5 \left[ 1 - \left[ 1 - 1,1286 \int_{\left(\frac{1}{mh_b^2}\right)^{0,5}}^{\infty} e^{-t^2} dt \right]^m \right]$$

В таблице 2 представлены оценки  $P_0 = f(m, h_b^2)$ .

Анализ таблицы 2 позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением глубины перемежения  $m$  требуемое значение  $h_b^2$  уменьшается, хотя энергия сигнала на передачу  $h_s^2$  увеличивается ( $m=8, h_s^2 = 0,37844 \times 8 = 3,0275$  при  $P_0 = 0,05395$ ;  $m=16, h_s^2 = 3,632$  при  $P_0 = 0,05395$ );

- длина пакета ошибок, исправляемых СПД, равна  $T_n = m t_{II}$  ( $m=8$  значение  $T_n = 8 \times 13 = 104$  двоичных символа;  $m=16$  значение  $T_n = 208$  двоичных символов).

## 2. Помеха представлена узкополосным гармоническим сигналом

Тогда вероятность  $P_0$  равна:

$$P_0 = 0,5 \left[ 1 - \left[ 1 - 0,5643 \int_{\left(\frac{1}{mh_b^2} + \frac{P_n}{P_c B}\right)^{0,5}}^{\infty} e^{-t^2} dt \right]^m \right]$$

**Таблица 2**  
Оценки  $P_0 = f(m, h_b^2)$  для кода  $(127, 50, 27)$

$P_b$	$P_0$	$m$	$h_b^2$	$m$	$h_b^2$
$10^{-3}$	0,05395	8	0,37844	16	0,227
$10^{-7}$	0,02208	8	0,47863	16	0,27733

**Таблица 3**  
Оценки  $P_0 = f(m, h_b^2, \frac{P_n}{P_c}, B)$  для кода  $(127, 50, 27)$

$P_b$	$P_0$	$\frac{P_n}{P_c}$	$m=B$	$h_b^2$	$\frac{P_n}{P_c}$	$m=B$	$h_b^2$	$m$	$B$	$h_b^2$	$\frac{P_n}{P_c}$	$m$	$B$	$h_b^2$
$10^{-3}$	0,05395	2	16	0,302	4	16	0,75683	16	32	0,302	10	16	64	0,354
$10^{-7}$	0,02208	2	16	0,4603	4	16	5,6885	16	32	0,4603	10	16	64	0,5943

В таблице 3 представлены оценки  $P_0 = f(m, h_b^2, \frac{P_n}{P_c}, B)$ .

Анализ таблицы 3 показывает:  $\frac{P_n}{P_c}$

- при увеличении отношения  $\frac{P_n}{P_c}$  для обеспечения заданного значения  $P_0$  требуется значительное увеличение  $h_b^2$ ;

- при увеличении длины ПСП ( $B$ ) можно обеспечить заданное значение  $P_0$  при  $h_b^2 < 1$ , при этом коэффициент расширения спектра сигнала увеличится незначительно ( $K_s = \frac{B}{m} = \frac{64}{16} = 4$ ).

### 3. Импульсная прерывистая помеха

Вероятность  $P_0$  равна:

$$P_0 = 0,5 \left[ 1 - \left[ 1 - 1,1286 \rho \int_0^{\infty} e^{-t^2} dt \right]^m \right]$$

$\left( \frac{1}{mh_b^2} \frac{P_n}{2P_c \rho B} \right)^{-0,5}$

где  $\rho$  – скважность импульсной помехи, характеризующая степень перекрытия частотным спектром помехи частотного спектра полезного сигнала.

В таблице 4 представлены оценки  $P_0 = f\left(m, h_b^2, \frac{P_n}{P_c}, \rho, B\right)$ .

Анализ таблицы 4 показывает:

- увеличение длины ПСП ( $B=32$ ) позволяет обеспечить требуемое значение  $P_0$  и помехоустойчивость  $P_b$  для  $\frac{P_n}{P_c}=4$  при одинаковых значениях  $m, \rho, h_b^2$ ;

- при одинаковых значениях  $m, B, \frac{P_n}{P_c}$  гармоническая помеха более опасна (таблица 3) по сравнению с импульсной;

- уменьшение значения  $\rho$  требует увеличения  $h_b^2$  для обеспечения заданных вероятностей  $P_b$  и  $P_0$ .

### Заключение

1. Применение перемежителя двоичных кодовых комбинаций позволяет отказаться от не двоичных кодов в качестве первой ступени кодирования и в то же время обеспечить исправление длинных пакетов двоичных ошибок.

2. Глубина перемежения  $m$  обеспечивает требуемую длину пакета исправляемых ошибок и должна быть равна длине ортогональной последовательности Уолша-Адамара.

3. Увеличение длины ортогональной последовательности и глубины перемежения  $m$  влечет увеличение длины пакета исправляемых ошибок.

4. Применение ПСП обеспечивает тактовую самосинхронизацию принимаемого сигнала, а увеличение длины ПСП ( $B > m$ ) способствует повышению помехоустойчивости при коэффициенте расширения спектра сигнала  $K_s = \frac{B}{m} < B$ .

5. Требуемые значения помехоустойчивости (вероятности  $P_b$ ) обеспечиваются при  $h_b^2 < 0,69$  (теоретический предел К. Шеннона).

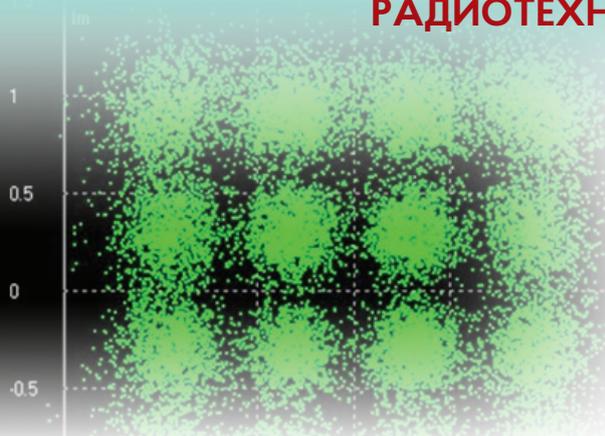
### Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. Пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2007. 1104 с.
2. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Дурнов А.С. Статистические характеристики систем передачи с кодовым ортогональным уплотнением данных при воздействии гауссова шума // Электросвязь, 2018. №7. С. 42-45.
3. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Дурнов А.С. Каскадное кодирование данных с параллельными ортогональными внутренними кодами // Известия Института инженерной физики, 2018. №3(49). С.46-49.
4. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Шмырин Е.В. Дурнов А.С. Каскадное кодирование данных эквидистантными двоичными и ортогональными двоичными кодами // Известия Института инженерной физики, 2018. №4(50). С.46-49.
5. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Черноусов М.С. Метод оценки помехоустойчивости цифровых систем передачи с кодовым уплотнением данных при воздействии стационарных помех // Известия Института инженерной физики, 2020. №4(58). С.31-36.

**Таблица 4**

Оценки  $P_0 = f\left(m, h_b^2, \frac{P_n}{P_c}, \rho, B\right)$  для кода (127, 50, 27)

$P_b$	$P_0$	$m$	$B$	$\frac{P_n}{P_c}$	$\rho$	$h_b^2$	$m$	$B$	$\frac{P_n}{P_c}$	$\rho$	$h_b^2$
$10^{-3}$	0,05395	16	16	2	0,75	0,2931	16	32	4	0,75	0,2931
$10^{-7}$	0,02208	16	16	2	0,75	0,40272	16	32	4	0,75	0,40272
$10^{-7}$	0,02208	16	16	2	0,45	0,4853	16	32	4	0,45	0,4853



УДК 621.376

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ДЕМОДУЛЯТОРА БЛОЧНЫХ СИГНАЛОВ С КВАДРАТУРНО- АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

## FEATURES OF IMPLEMENTATION OF A BLOCK SIGNAL DEMODULATOR WITH SQUARE- AMPLITUDE MODULATION

**Олег Игоревич Атакищев**

доктор технических наук, профессор  
заместитель генерального директора  
по специальным проектам  
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: aoii007@mail.ru

**Константин Юрьевич Рюмшин**

доктор технических наук  
ведущий научный сотрудник  
ФГБОУ ВО «МТУСИ»  
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а  
Тел.: +7 (495) 957-77-31  
E-mail: e8@mail.ru

**Андрей Алексеевич Амелёнков**

кандидат экономических наук, доцент  
начальник исследовательской части  
ФГБОУ ВО «МГЛУ»

Адрес: 119034, Москва, ул. Остоженка, д. 38, стр. 1  
E-mail: amelioncov@linguanet.ru

**Алексей Павлович Журавлёв**

начальник лаборатории  
ФГБОУ ВО «МТУСИ»  
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а  
Тел.: +7 (495) 957-77-31  
E-mail: arpal@yandex.ru

### Аннотация

В статье рассмотрены специфика и реализационные аспекты при синтезе робастных методов демодуляции сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией.

**Ключевые слова:** демодулятор сигнала, квадратурное представление сигнала, коррелятор, определение несущей, восстановление несущей адаптивный корректор.

### Summary

The article discusses the specificity and implementation aspects of the synthesis of robust methods for demodulation of signals with quadrature-amplitude modulation.

**Keywords:** signal demodulator, signal quadrature representation, correlator, carrier detection, carrier recovery adaptive equalizer.

Рассматриваемый в данной статье алгоритм демодуляции включает весь комплекс этапов цифровой обработки сигнала – от входного цифрового сигнала с частотой дискретизации  $F_d = 1/T$  ( $T$  – интервал дискретизации) до получения выходной битовой последовательности. Среди основных этапов цифровой обработки фазоманипулированных (ФМ) и квадратурно-амплитудно модулируемых (КАМ) сигналов можно выделить следующие: преобразование сигнала в квадратурный низкочастотный вид, автоматическая регулировка усиления (АРУ), адаптивная коррекция для компенсации канальных искажений и межсимвольной интерференции, подстройка несущей частоты, детектирование (принятие решения о переданном символе). Особенности структуры блочных (пакетных) сигналов вызывают необходимость использования дополнительных методов обработки: корреляционный

обнаружитель уникального слова, детектор огибающей сигнала, восстановление несущей частоты по уникальному слову.

Как правило, блочный ФМ/КАМ сигнал имеет такую структуру - в начале блока передается заранее известное уникальное слово (преамбула). Тактовая расстройка за время обработки одного пакета компенсируется адаптивным корректором. Для проведения анализа работы демодулятора входной блочный сигнал формировался в имитаторе. При этом длина и структура преамбулы были выбраны на примере стандартов систем спутниковой связи линейки DVB.

Структурная схема демодулятора изображена на *рисунке 1*. На схеме поэтапная цифровая обработка представлена комплексными сигналами  $x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ . Рассмотрим предложенную схему детально.

*Квадратурное представление сигнала. Данный*

этап обработки включает в себя: генератор несущей частоты (ГН), умножители и два фильтра нижних частот (ФНЧ).

Каждый ФНЧ является нерекурсивным цифровым фильтром с постоянными коэффициентами. Если на вход ФНЧ подается сигнал  $x(nT)$ , на выходе будет сигнал  $y(nT)$ :

$$y(nT) = \sum_{i=-P/2}^{i=P/2} K_i x[(n+i)T] h_i = \frac{\sin(\pi \cdot f_{cp} \cdot i / F_d)}{\pi \cdot i}, \quad (1)$$

где  $K_i$  – коэффициенты фильтра;  
 $P$  – порядок фильтра.

Для расчета коэффициентов фильтров  $K_i$  используется формула расчета импульсной характеристики идеального ФНЧ [1]:

$$h_i = \frac{\sin(\pi \cdot f_{cp} \cdot i / F_d)}{\pi \cdot i}, \quad (2)$$

которая взвешивается окном Хэмминга:

$$k_i = 0.54 + 0.46 \cdot \cos(2\pi \cdot i / P), \quad i = -P/2, \dots, 0, \dots, P/2, \quad (3)$$

где  $f_{cp}$  – частота среза.

В итоге для коэффициентов фильтров запишем:

$$K_i = h_i \cdot k_i / H, \quad i = -P/2, \dots, 0, \dots, P/2, \quad (4)$$

где  $H$  – коэффициент нормировки, равный сумме  $h_i$ .

Если  $s(nT)$  – отсчеты входного сигнала, то комплексный сигнал с выходов ФНЧ  $x_0 = x_{0_{re}} + j \cdot x_{0_{im}}$  будет иметь вид:

$$x_0(nT) = \sum_{i=-P/2}^{i=P/2} K_i \cdot s(n+i)T \exp(-j2\pi f_0(n+i)T) \quad \text{для } n > P/2, \quad (5)$$

где  $f_0$  – несущая частота.

**Коррелятор.** Корреляционное обнаружение ФМ блочных видов передач рассмотрено в [1,2]. Возможность устойчивого обнаружения уникального слова в сигнале сохраняется при отношении сигнал/шум более 3 дБ, ошибки несущей частоты  $|\Delta f_0| < 0.02 \cdot F_s$ , где  $F_s$  – символьная скорость (тактовая частота).

В корреляционном обнаружителе рассчитывается квадрат модуля корреляции квадратурного сигнала с преамбулой, усредненный по ее длине:

$$Z(nT) = [(\sum_{i=0}^{N-1} (x_{0_{re}}(nT-S \cdot i)p_{re}(i) - x_{0_{im}}(nT-S \cdot i)p_{im}(i)))^2 + (\sum_{i=0}^{N-1} (x_{0_{re}}(nT-S \cdot i)p_{im}(i) + x_{0_{im}}(nT-S \cdot i)p_{re}(i)))^2] / N^2, \quad (6)$$

где  $S = F_d / F_s$  – количество отсчетов на символ;  
 $p(i)$  – комплексные значения, соответствующие фазовым эквивалентам символов преамбулы;  
 $N$  – длина преамбулы.

Затем  $Z(nT)$  сравнивается с динамически изменяющимся порогом. Порог принятия решения об обнаружении преамбулы вычисляется в соответствии с критерием Неймана-Пирсона и задается таким образом:

$$U_n = A_n^2 \sqrt{-2 \cdot \ln P_{\text{лм}}}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{лм}}$  – вероятность ложной тревоги срабатывания обнаружителя (выбирается меньше  $10^{-5}$ );  
 $A_n$  – выход фильтра детектора огибающей с постоянной времени  $\tau_B$ , фактически усредненное значение амплитуды сигнала.

Изменение порога обнаружения проводится только после определения фронта пакета детектором огибающей.

**Детектор огибающей сигнала.** Данный элемент приблизительно регистрирует появление фронта и среза пакета. Он состоит из двух однотипных интегрирующих фильтров. Первый фильтр с меньшей постоянной времени  $\tau_B = 0,005$  сек можно назвать «быстрым», а второй – «медленным» (с большей постоянной времени  $\tau_M = 0,05$  сек). Сравнение сигналов с выходов этих фильтров позволяет с некоторой погрешностью определить моменты перепадов уровня сигнала. Сигналы с выходов фильтров вычисляются так:

$$A_n = K_1 A_{n-1} + K_2 |x_0(nT)|, \quad (8)$$

где  $K_1 = \exp(-\frac{1}{\tau_B F_s})$ ,  $K_2 = 1 - K_1$ ;  $\tau_B$ ,  $\tau_M$  – базовые коэффициенты фильтров, которые соответствуют постоянной времени,  $\tau_B > \tau_M$ .

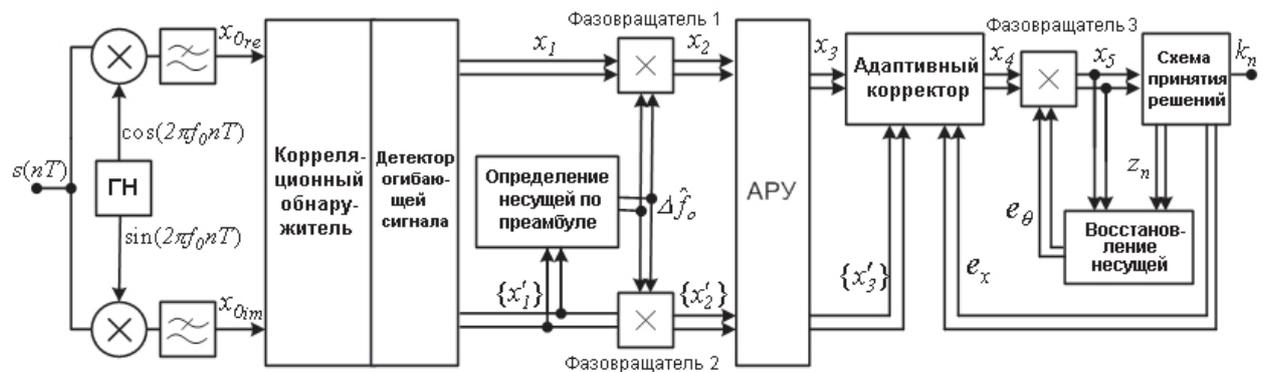


Рис. 1. Структурная схема демодулятора

Скачки уровня огибающей сигнала регистрируются независимо от амплитуды сигнала. Фронт и срез пакета обнаруживаются в соответствии с условиями:

$$(A_{Bn} - A_{Mn}) / A_{Bn} > V_{ФР} \text{ и } (A_{Mn} - A_{Bn}) / A_{Mn} > V_{СР} \quad (9)$$

где  $V_{ФР}$ ,  $V_{СР}$  – пороговые коэффициенты фронта и среза пакета, выбираются от 0.1 до 0.9.

Корреляционный обнаружитель преамбулы и детектор огибающей при обнаружении пакета включают в работу остальную часть демодулятора, поэтому на рисунке 1 данные элементы разделяют демодулятор на две части: непрерывно функционирующую и работающую в пакете. На вход последней поступает комплексный сигнал пакета  $x_1$  (равен сигналу  $x_0$  в период передачи пакета) для дальнейшей обработки и сигнал обнаруженной преамбулы  $\{x'_1\}$ , который представляет из себя последовательность отсчетов длиной  $N \cdot S$ , где  $N$  – длина преамбулы,  $S$  – количество отсчетов на символ.

*Определение несущей по преамбуле.* Расстройка несущей частоты определяется из сигнала преамбулы  $\{x'_1\}$ , обнаруженной коррелятором. Алгоритм оценки отклонения несущей [3], в первом приближении сводится к выражению

$$\Delta \hat{f}_0 = \frac{1}{\pi \cdot T(1 + N/2)} \arg \left\{ \sum_{k=1}^{N/2} R(k) \right\}, \quad (10)$$

где  $R(k)$  – автокорреляционная функция отношения выборки сигнала преамбулы и значений, соответствующих структуре преамбулы.

$$R(k) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N R_{i-k}, \quad (11)$$

$$R_{i-k} = y(i)T y[(i-k)T] = \frac{x'_1(iST)}{p(i)} \cdot \left[ \frac{x'_1((i-k)ST)}{p(i-k)} \right]^*$$

где  $x'_1(nT)$  – комплексный сигнал обнаруженной преамбулы;

$p(n)$  – комплексные значения преамбулы;

$()^*$  – знак комплексного сопряжения.

По найденной расстройке несущей частоты с помощью фазовращателей корректируется сигнал пакета и сигнал обнаруженной преамбулы, по которому далее будет настраиваться адаптивный корректор. С выхода фазовращателя 1 сигнал  $x_2 = x_{2_{re}} + j \cdot x_{2_{im}}$  будет иметь вид:

$$x_{2_{re}}(nT) = x_{1_{re}}(nT) \cos(2\pi \Delta \hat{f}_0 T') - x_{1_{im}}(nT) \sin(2\pi \Delta \hat{f}_0 T'),$$

$$x_{2_{im}}(nT) = x_{1_{re}}(nT) \sin(2\pi \Delta \hat{f}_0 T') + x_{1_{im}}(nT) \cos(2\pi \Delta \hat{f}_0 T'), \quad (12)$$

где  $T' = kT$  – время, отсчитываемое от момента обнаружения преамбулы.

Скорректированный по частоте сигнал обнаруженной преамбулы  $\{x'_2\}$  с выхода фазовращателя 2 при входном  $\{x'_1\}$  вычисляется аналогично.

*Автоматическая регулировка усиления.* АРУ чувствительна к резким перепадам уровня сигнала,

поэтому ее нельзя ставить непосредственно на входе демодулятора или сразу после ФНЧ. Так как обнаружитель преамбулы, детектор огибающей и определение несущей по преамбуле построены таким образом, что их работа не зависит от общего уровня входного сигнала, АРУ устанавливается перед адаптивным корректором и работает только в момент обработки пакета. Последовательность  $\{x'_2\}$  целиком обрабатывается АРУ в момент обнаружения преамбулы.

Сигнал с выхода АРУ по мощности записывается так:

$$x_3(nT) = \frac{B_{APV} \cdot x_2(nT)}{2\sqrt{V_{APV}}(nT)}, \quad (13)$$

где  $B_{APV}$  – базовый коэффициент АРУ, выбирается в соответствии с мощностью заданной сигнально-кодовой конструкции (СКК):

$$B_{APV} = \sum_{i=1}^K |z(i)|^2 / \left( \sum_{i=1}^K |z_{re}(i)| + j \cdot |z_{im}(i)| \right), \quad (14)$$

где  $K$  – число точек в СКК;

$z(i)$  – комплексные координаты точек;

$v_{APV}(nT)$  – выход фильтра АРУ

$$v_{APV}(nT) = |x_2(nT)| K_{1_{APV}} + f_{APV}((n-1)T) K_{2_{APV}}, \quad (15)$$

$K_{1_{APV}} = \exp(-1/\tau_{APV} F_D)$ ,  $K_{2_{APV}} = 1 - K_{1_{APV}}$  – коэффициенты фильтра АРУ.

*Адаптивный корректор.* В реализованной модели демодулятора адаптивный корректор построен простейшим образом в виде нерекурсивного цифрового фильтра с перестраиваемыми коэффициентами [4], которые настраиваются по преамбуле в момент ее обнаружения и непосредственно по сигналу пакета в процессе обработки. В соответствии с методом минимизации среднего квадрата модуля сигнала ошибки трансверсальные коэффициенты корректора меняются следующим образом:

$$a_{n_{re}}(k+1) = a_{n_{re}}(k) - \delta [e_{x_{re}}(k) \cdot x_{3_{re}}(k-n) + e_{x_{im}}(k) \cdot x_{3_{im}}(k-n)], \quad (16)$$

$$a_{n_{im}}(k+1) = a_{n_{im}}(k) - \delta [e_{x_{im}}(k) \cdot x_{3_{re}}(k-n) - e_{x_{re}}(k) \cdot x_{3_{im}}(k-n)],$$

где  $\delta$  – базовый коэффициент настройки корректора ( $\delta = 0.001$ );

$e_x(k) = x_4(k) - z_k$  – ошибка комплексного сигнала с выхода корректора:  $x_4 = x_{4_{re}} + j \cdot x_{4_{im}}$ ;

$z_k$  – точки СКК, соответствующие минимальной  $e_x$ .

При настройке корректора по сигналу преамбулы ошибка  $e_x(k)$  вычисляется по выходному сигналу корректора  $x_4(k)$ , когда на входе прошедший через АРУ сигнал обнаруженной преамбулы  $\{x'_3(k)\}$ , который задержан на  $D/2$  отсчетов ( $D=50$  – порядок корректора).

На выходе адаптивного корректора получим сигнал:

$$x_{4_{re}}(nT) = \sum_{i=1}^D [x_{3_{re}}((n-i)T) a_{n_{re}}(i) - x_{3_{im}}((n-i)T) a_{n_{im}}(i)], \quad (17)$$

$$x_{4_{im}}(nT) = \sum_{i=1}^D [x_{3_{im}}((n-i)T) a_{n_{re}}(i) + x_{3_{re}}((n-i)T) a_{n_{im}}(i)].$$

*Схема принятия решения. Восстановление несущей*

щей. После адаптивного корректора сигнал поступает на фазовращатель, который, используя оценку расстройки частоты сигнала, устраняет неточность восстановления несущей по преамбуле. Сигнал с выхода фазовращателя  $x_s(nT)$  описывается выражением (12), если заменить  $2\pi\Delta f_0 T'$  на  $e_\theta$ . Схема принятия решения ставит в соответствие комплексному сигналу

$$x_s = x_{s_{re}} + j \cdot x_{s_{im}}$$

точку СКК  $z_n$ . Ошибка по фазе несущей равна:

$$e_\theta = K_\theta \frac{x_{s_{im}}(nT) \cdot z_{n_{re}} - x_{s_{re}}(nT) \cdot z_{n_{im}}}{x_{s_{re}}(nT) \cdot z_{n_{re}} + x_{s_{im}}(nT) \cdot z_{n_{im}}}, \quad (18)$$

где  $K_\theta$  – усиление петли обратной связи восстановления несущей.

Для получения показанных ниже графиков на демодулятор подавался имитационный сигнал ФМ-4,  $F_d = 9600$  Гц,  $F_T = 1200$  см/с,  $f_0 = 1700$  Гц, длина преамбулы  $N = 32$ , структура преамбулы в системе координат

СКК – 33330303000330333003003033000033.

Работа корреляционного обнаружителя преамбулы при различных вариантах входного сигнала показана на рисунке 2.

На рисунке 3 показаны СКК, которые построены по комплексным значениям  $x_s(nT)$  для различных отношений сигнал/шум входного сигнала.

Основываясь на полученных результатах, в заключение необходимо отметить, что неточность установки несущей частоты оказывает значительное влияние на уровень пика обнаружения преамбулы, а уменьшение отношения сигнал/шум повышает вероятность ложного срабатывания корреляционного обнаружителя (рисунк 2). Реализованный демодулятор устойчи-

во работает, когда расстройка несущей частоты  $|\Delta f_0| < 0.02 \times F_s$ , отношение сигнал/шум больше 5 дБ; при этом вероятность ошибки на бит выходной информационной последовательности демодулятора (без учета работы помехоустойчивого кодирования) будет меньше  $5 \cdot 10^{-2}$ .

## Литература

1. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1089 с.
3. Мартыросов В.Е. Оптимальный прием дискретных сигналов. М.: Радиотехника, 2010. 208 с.
4. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.



Рис. 2. Функция корреляции обнаружителя преамбулы при различных значениях отношения сигнал/шум и расстройки несущей частоты

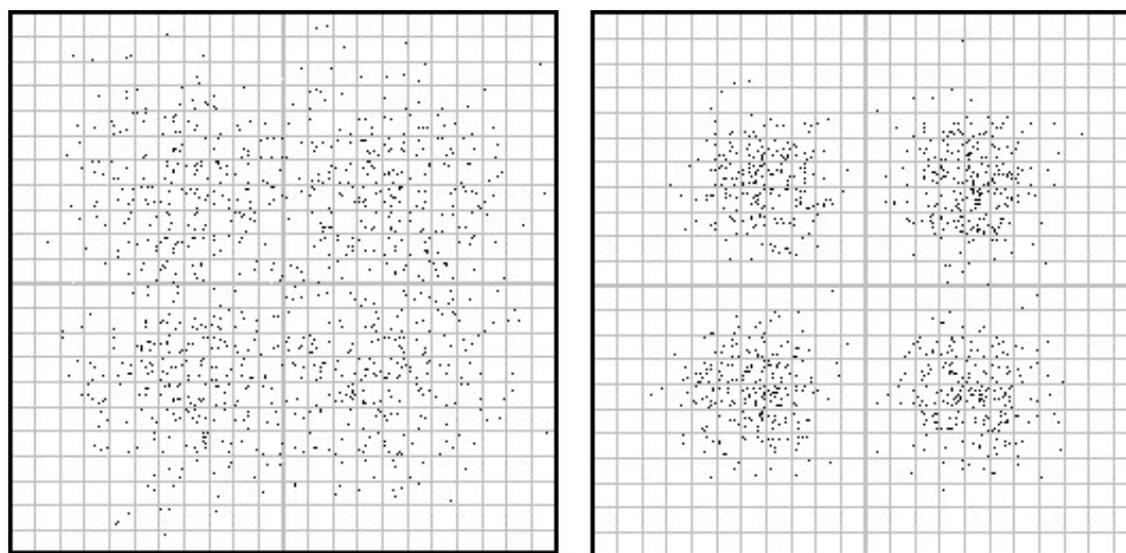


Рис. 3. СКК для двух значений отношения сигнал/шум

## СИСТЕМЫ СВЯЗИ

УДК 621.396

### ФОРМИРОВАНИЕ КЛЮЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СКРЫТОГО КАНАЛА С АДАПТИВНЫМ КОДОВЫМ УПЛОТНЕНИЕМ.

### KEY GENERATION FOR ORGANIZATION OF HIDDEN CHANNEL WITH ADAPTIVE CODE MULTIPLEXING

**Кирилл Юрьевич Цветков**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры  
Сетей и систем связи космических комплексов  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, Ждановская наб., д. 13  
Тел.: 8 (911) 947-19-58  
E-mail: wavelet3@yandex.ru

**Денис Владимирович Леванов**

адъюнкт кафедры  
Сетей и систем связи космических комплексов  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, Ждановская наб., д. 13  
Тел.: 8 (931) 244-93-24

**Анатолий Александрович Ерунов**

кандидат технических наук  
преподаватель кафедры  
Сетей и систем связи космических комплексов  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, Ждановская наб., д. 13  
Тел.: 8 (911) 289-22-05

#### Аннотация

В статье представлено пошаговое описание разработанного способа адаптивного встраивания кодово-уплотненного скрытого канала в спектральную область видеоданных до этапа сжатия. Адаптивное встраивание осуществляется на основе анализа значений пикселей кадров видео-контейнера, который позволяет учесть его переменную емкость и находить области, пригодные для встраивания ортогональных сигналов с меньшей избыточностью. Данный подход способствует не только повышению пропускной способности скрытого канала, но и снижению возникающих в нем ошибок.

**Ключевые слова:** цифровая стеганография, скрытые каналы, адаптивное кодовое уплотнение

#### Summary

The article presents a step-by-step description of the developed method of adaptive embedding of code multiplexing hidden channel in the spectral part of video data before the compression stage. Adaptive embedding is based on the analysis of the pixel values of the video container frames, which allows you to take into account its variable capacity and find frames suitable for embedding orthogonal signals with less redundancy. This approach allows not only to increase the hidden channel capacity, but also to decrease the errors in hidden channel

**Keywords:** digital steganography, hidden channels, adaptive code multiplexing.

#### Введение

В настоящее время для защиты информации при ее передаче в основном используются криптографические методы. Однако с появлением суперкомпьютеров значительно увеличиваются возможности криптоанализа. Альтернативным и в то же время дополнительным способом защиты информации является сокрытие факта наличия информационного обмена, за счет применения скрытых каналов связи. Формирование скрытых каналов связи относится к ключевому направлению цифровой стеганографии.

#### Основные понятия и определения цифровой стеганографии

В отличие от криптографии, в области стеганографии не предусмотрено использование единой терминологии. В этой связи в статье использует-

ся тезаурус, приведенный в работах [1,2].

Контейнер – любая информация, предназначенная для сокрытия тайных сообщений.

Заполненный контейнер или стего-контейнер, содержащий встроенную информацию.

Встроенное (скрытое) сообщение – сообщение, встраиваемое в контейнер.

Стеганографический канал или просто стего-канал – канал передачи стего.

Ключ (ключевая информация) – секретный ключ, необходимый для сокрытия информации, определяющий правила встраивания сообщения.

Процесс передачи данных по скрытому каналу описывает обобщенная модель стегосистемы, представленная на *рисунке 1*. Скрываемое сообщение по выбранному правилу встраивается в контейнер, в результате чего формируется заполненный контейнер. На приемной стороне

## СИСТЕМЫ СВЯЗИ

получатель в соответствии с выбранным правилом извлекает из заполненного контейнера скрытое сообщение.

Построение любой стegosистемы включает в себя выполнение следующих этапов:

- выбор контейнера  $I$ ;
- выбор правила встраивания  $p$ ;
- встраивание сообщения;
- оценивание скрытности встраивания;
- передача заполненного контейнера;
- извлечение сообщения из заполненного контейнера;
- оценивание достоверности приема сообщения.

На первом этапе принимается решение о выборе контейнера для встраивания сообщения. В статье в качестве контейнера используются видеоданные, и в дальнейшем будут называться видео-контейнером. Выбор видеоданных обусловлен их избыточностью и возможностью скрытно передавать в них сообщения большего размера.

С целью выбора правила встраивания  $p$ , от которого зависит какие искажения  $A$  вносятся в видео-контейнер, был осуществлен обзор отечественной и иностранной литературы, посвященной и скрытой передаче информации методами цифровой стеганографии в видеоданных [3]. Установлено, что наибольшей скрытностью обладают методы встраивания данных в частотную составляющую видеоизображения до этапа сжатия данных. Так как во время сжатия часть данных теряется, необходимо использовать помехоустойчивое кодирование скрываемых данных. При этом применение кодового разделения скрываемых данных дополнительно

позволяет организовать скрытый канал связи с множественным доступом, за счет кодового уплотнения скрытого канала (КУСК) [4].

Основным недостатком метода КУСК является допущение о том, что все  $i$ -е кадры могут быть пригодны для встраивания. Данное допущение может приводить к возникновению ошибок и требует реализации адаптивного встраивания данных, за счет учета переменной емкости видео-контейнера.

### Модель скрытого канала с адаптивным кодовым уплотнением

На основе выбранного метода прототипа была разработана модель скрытого канала, представленная на рисунке 2.

Изменяемыми параметрами в данной модели являются:

- видео-контейнер  $I$ ;
- встраиваемое сообщение  $S$ ;
- $N$  – соответствует периоду, на котором могут существовать ортогональные сигналы ( $m$ -последовательность, Франка-Уолша (Ф-У), Франка-Кретенсона (Ф-К)). Размер блока  $N*N$  пикселей кадра видео-контейнера  $I$  совпадает с размером матриц  $E$  и  $W$ ;
- выбор двумерной шумоподобной сигнальной конструкции (ДШСК)  $E$  ( $m$ -последовательность, Ф-У, Ф-К) для кодового уплотнения скрываемого сообщения;
- выбор спектрального преобразования  $W$  блока изображения (ДКП, Уолша, Виленкина-Кретенсона (В-К));
- $b, b+1$  – номера бит коэффициентов оцифрованного спектра ортогонального преобразования (ОртП) куда встраиваются данные;
- $q$  – качество сжатия.

Данная модель разделяется на блоки, в зависимости от проводимых в них операций:

1. Блок выбора пары тип ДШСК – Тип ОртП. Выбор проводится с учетом показателя Ипатова. Его физический смысл заключается в



Рис. 1. Обобщенная модель стegosистемы

Таблица 1

Значения показателя оптимальности  $\gamma$  исследуемых сигналов при различных ортогональных преобразованиях

Сигналы	Базис, в котором проведено ортогональное преобразование		
	ДКП	Уолша	В-К
М-последовательность	2,7	15,2	10,6
Двумерные Франка-Уолша	6,1	1	1
Двумерные Франка-Кретенсона	4,6	3,2	1

# СИСТЕМЫ СВЯЗИ

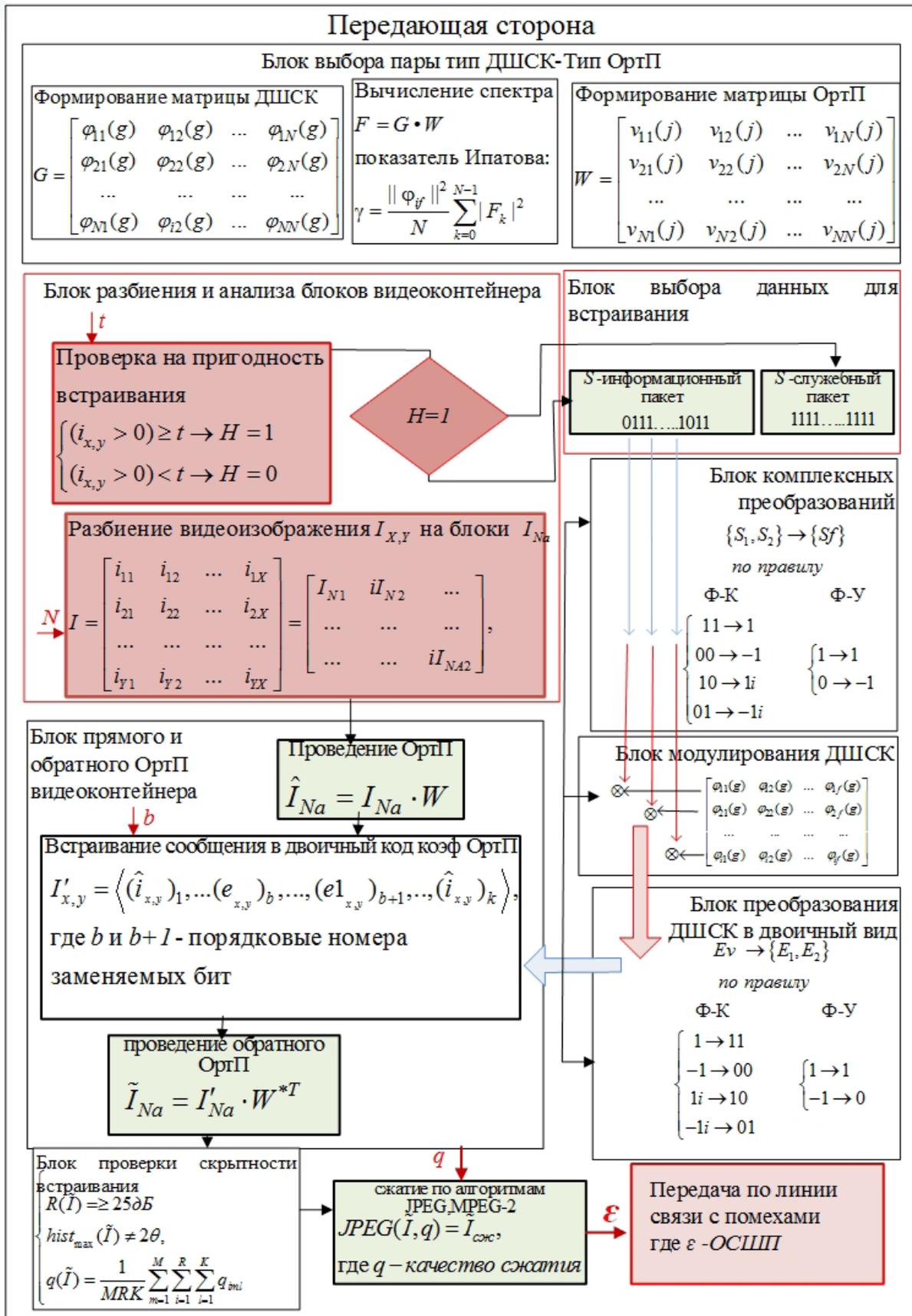


Рис. 2. Модель скрытого канала с адаптивным кодовым уплотнением

оценке коэффициентов спектра сигнала: отсутствие нулевых составляющих, а также равенство коэффициентов спектра между собой по модулю свидетельствуют о равномерности распределения энергетике сигнала по спектральным составляющим. При этом минимальное возможное значение равно единице. Как видно из *таблицы 1* наиболее предпочтительными являются пары ДШСК Ф-У – ОртП Уолша, а также ДШСК Ф-К – ОртП В-К.

2. Блок разбиения и анализа блоков видео-контейнера.

$I$ -кадр видео-контейнера разбивается на блоки размером  $N*N$  пикселей. Каждый блок оценивается на пригодность к встраиванию (в зависимости от числа нулевых пикселей)

3. Блок выбора данных для встраивания.

В зависимости от пригодности блока видео-контейнера для встраивания, осуществляется выбор информационного или служебного пакета. Встраивание служебного пакета необходимо для равномерного зашумления всего кадра.

4. Блок модулирования ДШСК.

Каждая строка исходной ДШСК побитно перемножается на значение, соответствующее встраиваемому сообщению по правилу:

$$\begin{array}{cc} \text{Ф-К} & \text{Ф-У} \\ \left\{ \begin{array}{l} 11 \rightarrow 1 \\ 00 \rightarrow -1 \\ 10 \rightarrow li \\ 01 \rightarrow -li \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 1 \rightarrow 1 \\ 0 \rightarrow -1 \end{array} \right. \end{array}$$

5. Блок преобразования ДШСК в двоичный вид.

Модулированное ДШСК перед встраиванием в коэффициенты ОртП преобразуется в двоичный вид по правилу:

$$\begin{array}{cc} \text{Ф-К} & \text{Ф-У} \\ \left\{ \begin{array}{l} 1 \rightarrow 11 \\ -1 \rightarrow 00 \\ li \rightarrow 10 \\ -li \rightarrow 01 \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} 1 \rightarrow 1 \\ -1 \rightarrow 0 \end{array} \right. \end{array}$$

6. Блок прямого и обратного ОртП видео-контейнера.

После прямого ОртП значений яркости или цветности пикселей видео-контейнера в выбранном базисе осуществляется замена  $b$ -го и  $b+1$ -го бита коэффициента ОртП встраиваемыми данными с последующим обратным ОртП.

7. Блок проверки скрытности встраивания

Проверка на скрытность встраивания в видео-контейнере непосредственно влияет на возможность создания в нем скрытого канала. Результаты оценивания скрытности встраивания позволяют определить допустимый уровень вносимых искажений в видео-контейнер.

### Результаты оценивания скрытности при встраивании сообщений разработанным способом

При оценке скрытности встраивания обязательным является визуальная проверка качества видеоизображения, поскольку при появлении артефактов встраивания нарушается сама суть стеганографии – скрытная передача сообщения. Экспертом при оценке визуального качества выступает система человеческого зрения (СЧЗ). Так как у каждого человека СЧЗ индивидуальна целесообразно использовать результаты оценки от группы лиц. В качестве такого показателя в работе используется усредненная субъективная оценка качества видеоданных [5].

$$q = \frac{1}{MRK} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^R \sum_{l=1}^K q_{iml} \quad (1)$$

где  $M$  – число наблюдателей;

$R$  – число испытательных изображений;

$K$  – число предъявлений каждого изображения;

$i$  – номер наблюдения;

$m$  – номер испытательного изображения;

$l$  – номер предъявления;

$q_{iml}$  – оценка  $m$ -го испытательного изображения  $i$ -м наблюдателем.

На *рисунке 3* представлены результаты оценивания визуального качества видеоданных после встраивания в различные видео-контейнеры. Наилучшую скрытность встраивания показали варианты встраивания ДШСК Ф-У и Ф-К в коэффициенты ОртП Уолша и В-К при замене не более 5-6 бита.

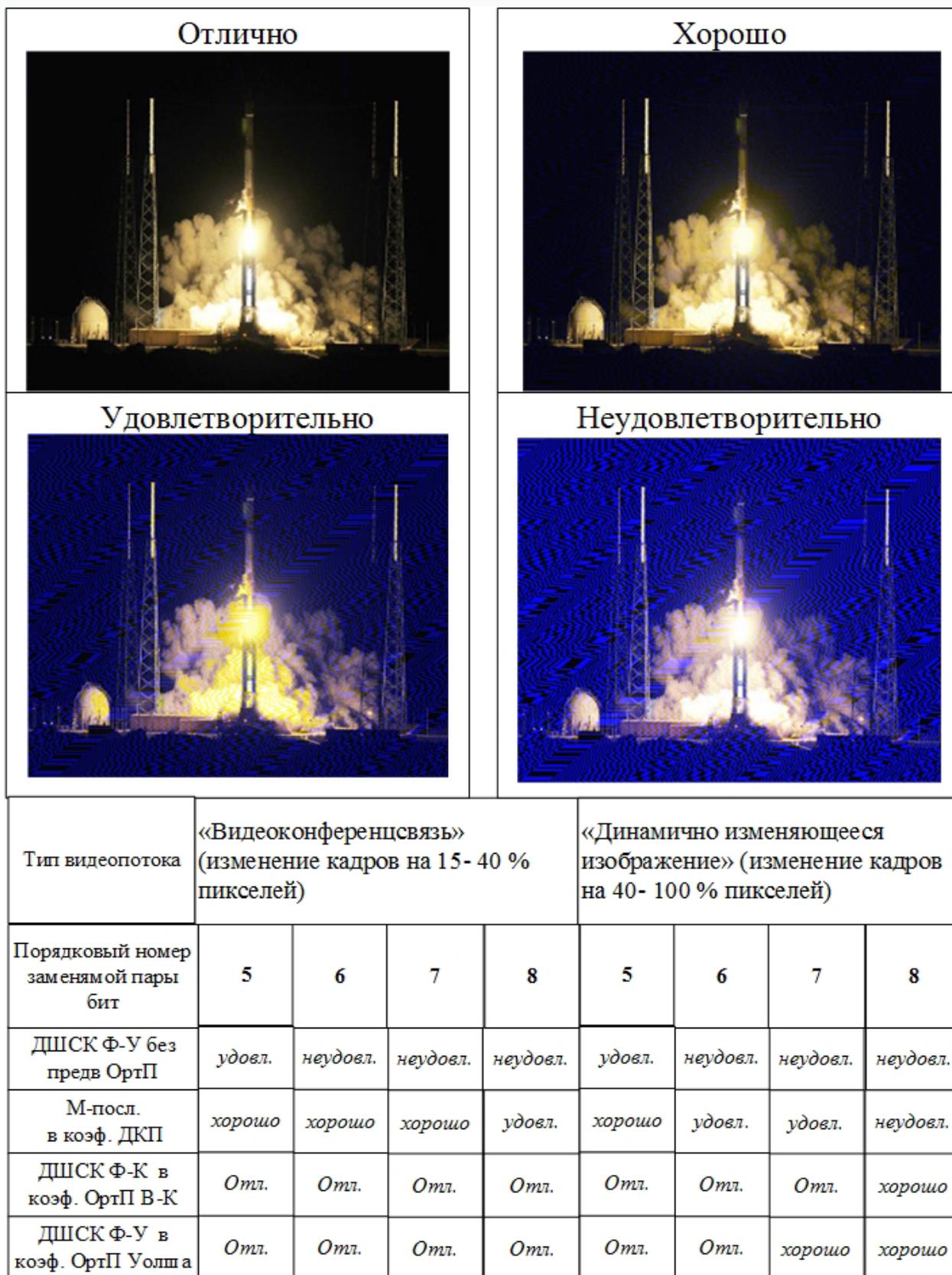
На ряду использованием субъективного способа оценивания скрытности встраивания данных в видеоданные используется объективный способ. Одним из основных и часто используемых на практике параметров оценивания качества видеоданных является пиковое отношение сигнал-шум (ПОСШ). Для определения скрытности встраивания данный параметр вычисляется для изображений после встраивания скрываемых данных. В соответствии с ГОСТ [6] качество видеоданных считается «отличным» при значении ПОСШ не менее 60 дБ, и «удовлетворительным» при значении ПОСШ не менее 25 дБ. На *рисунке 4* представлены результаты оценивания скрытности встраивания по ПОСШ.

Анализ представленных графиков позволяет сделать следующие выводы:

- встраивание данных с проведением ОртП В-К и Уолша вносит меньшие искажения по сравнению с ДКП;

- крайними парами заменяемых бит оцифрованного спектра ОртП В-К (Уолша) при встраивании ДШСК Ф-К (Ф-У) с периодами:

## СИСТЕМЫ СВЯЗИ



**Рис. 3.** Расчет усредненной субъективной оценки качества видеоданных

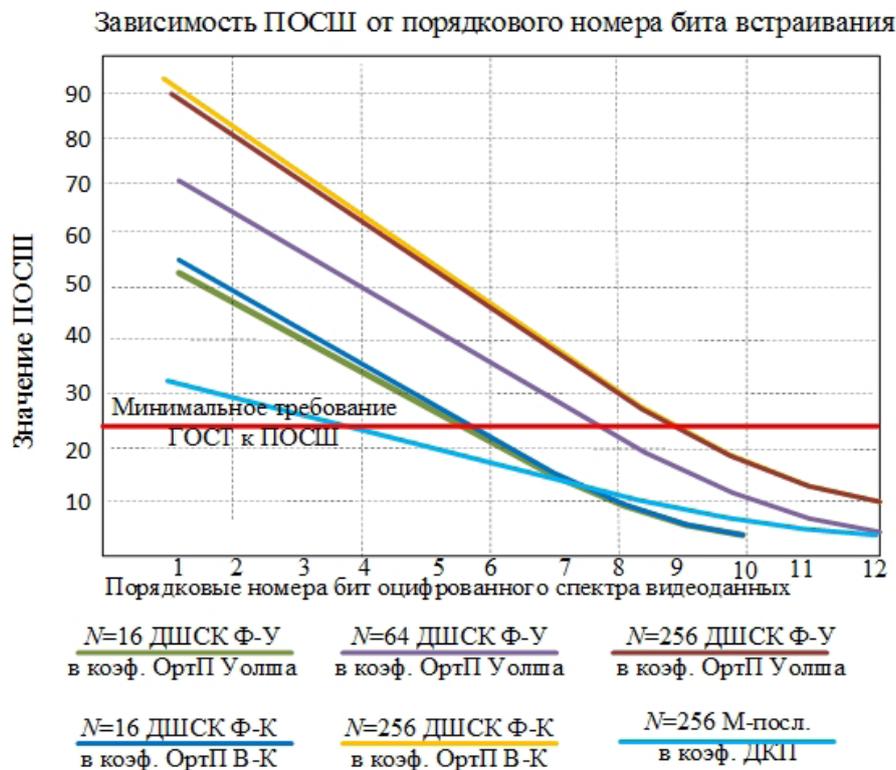
## СИСТЕМЫ СВЯЗИ

$N=256$  являются 8, 9-й;  
 $N=64$  являются 7, 8-й;  
 $N=16$  являются 7, 8-й.

Помимо показателя ПОСШ при оценке скрытности встраивания в работе дополнительно учтен метод стегоанализа, направленный на исследование гистограмм видеоизображения. Методы встраивания данных в частотную область обладают демаскирующим признаком, называемым раздвоением пика гистограммы. Однако анализ встраивания данных в спектральную область в коэффициенты ДКП показал о наличии

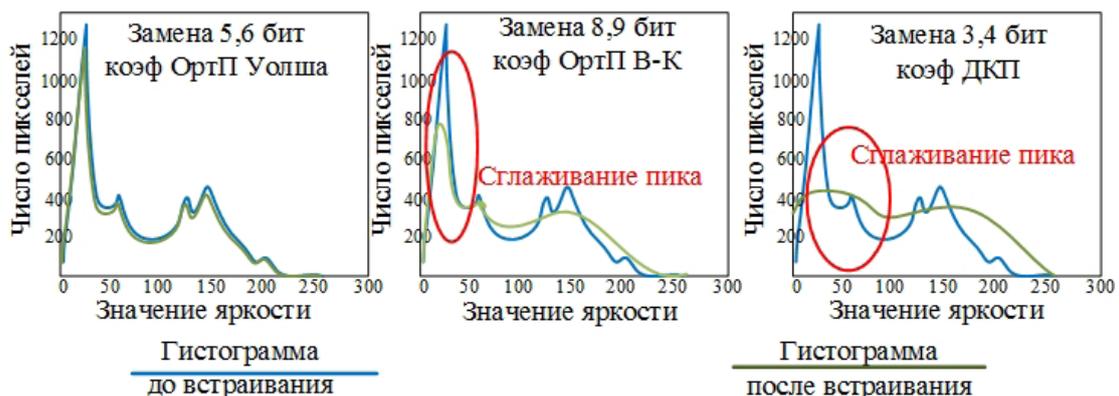
другого демаскирующего признака «сглаживание пика гистограммы». Данный признак говорит о наличии большого шума распределенного по спектру видеоизображения. Данный признак появляется при замене старших разрядов бит в коэффициентах ОртП В-К и Уолша. Результаты оценивания гистограмм приведены на *рисунке 5*.

Проведенные исследования по определению скрытности встраивания позволяют решить только одну задачу основного противоречия стеганографии (*рисунком б*) между скрытой пропускной способностью  $S_{стег}$ , скрытностью



**Рис. 4.** Оценивание скрытности встраивания в видеоданные по показателю пикового отношения сигнал/шум

### Сравнение гистограмм изображения до и после встраивания



**Рис. 5.** Оценивание скрытности встраивания в видеоданные по анализу гистограммы видеоизображения

встраивания  $U$  и достоверностью приема  $P_{ош}$ . Фактически была получена оценка максимально допустимых искажений  $A$  для разработанного правила встраивания данных  $p$ , которое не превышает требуемую скрытность  $U_{\text{треб}}$ .

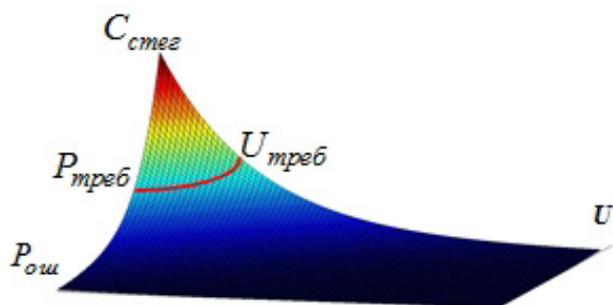


Рис. 6. Основное противоречие в стеганографии

### Результаты оценивания достоверности приема при встраивании сообщений разработанным способом

Следующим ограничивающим фактором при организации скрытого канала является требование к достоверности приема  $P_{\text{треб}}$ . В работе в качестве минимально значения достоверности выбрано значение вероятности ошибки на бит  $10^{-3}$ . Данное требование предъявляется к каналам связи при передаче речевых и текстовых сообщений.

При встраивании сообщения в коэффициенты ОртП видео-контейнера были выявлены и учтены основные причины появления ошибок:

#### 1. Округление значений пикселей на этапе прямого и обратного ОртП.

Зависимость вероятности ошибки на бит для скрываемых данных от номера пары бит встраивания

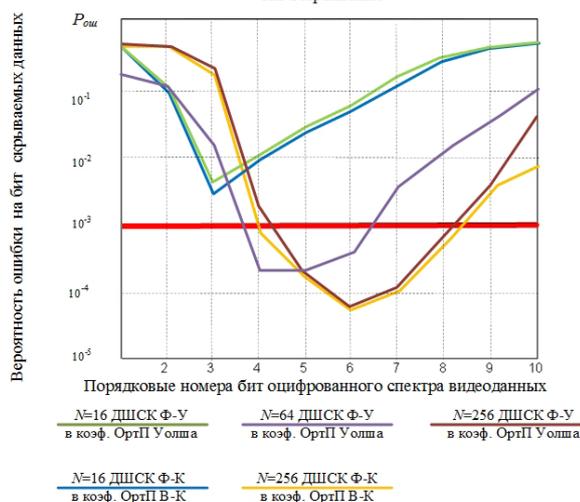


Рис. 7. Зависимость вероятности ошибки на бит для скрываемых данных от номера пары бит встраивания

На рисунке 7 представлены результаты оценивания достоверности приема скрываемых данных от порядкового номера пары бит встраивания  $b$  для ДШСК Ф-К и Ф-У. Как видно из графиков минимальный период ДШСК  $N$ , пригодный для встраивания, равен 64 при замене с 4 по 6 биты и  $N=256$  с 4 по 8 и биты соответственно. ДШСК Ф-К дают незначительный выигрыш по сравнению с ДШСК Ф-У. Так как на периоде  $N=64$  ДШСК Ф-К не существует, в блоках данной размерности целесообразно использовать ДШСК Ф-У.

#### 2. Наличие в изображении нулевых пикселей.

При проведении над пикселями с нулевыми значениями ОртП получаемые коэффициенты ОртП также будут равны нулю. В результате чего встроенные в них данные будут теряться. На рисунке 8 представлены результаты оценивания вероятности ошибки на бит скрываемых данных от числа нулевых пикселей. Наличие в строке изображения нулевых пикселей более 15% для ДШСК с периодом  $N=64$  (20 при  $N=256$ ) приводит к появлению ошибок. Данные исследования, позволили сформировать критерий встраивания, от которого принимается решение о передаче информационного или служебного пакета. С учетом последующей процедуры сжатия значение нулевых пикселей не должно превышать 5% в каждой строке.

#### 3. Сжатие данных.

На данном этапе преобразования видеоданных в видеокодере происходят основные потери встроенных данных. На рисунке 9 представлены результаты оценивания вероятности ошибки на бит скрываемых данных от качества сжатия. Минимальное качество сжатия видео-контейнера, позволяющее извлечь скрываемые данные с вероятностью ошибки не хуже  $10^{-3}$  для пери-

Зависимость вероятности ошибки на бит скрываемых данных от числа нулевых пикселей

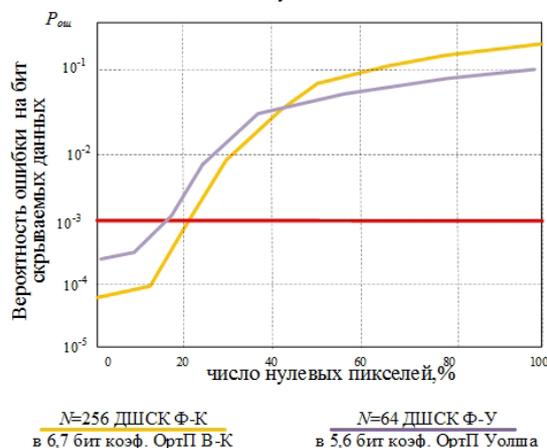
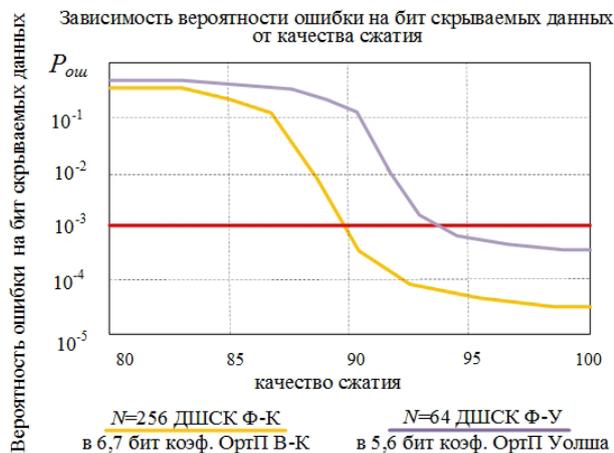


Рис. 8. Зависимость вероятности ошибки на бит для скрываемых данных от номера пары бит встраивания

## СИСТЕМЫ СВЯЗИ

одов ДШСК  $N=256$  и  $64$  составляет  $90$  и  $94$  соответственно. При таком качестве обеспечивается сжатие  $I$ -кадра в  $10-12$  раз, а видеопотока в зависимости от динамики его изменения в  $60-100$  раз



**Рис. 9.** Зависимость вероятности ошибки на бит скрываемых данных от качества сжатия

#### 4. Помехи в канале связи, по которому передается видео-контейнер.

На рисунке 10 представлены результаты оценивания помехоустойчивости скрываемых данных в канале связи с помехами при передаче ФМ-4 сигналов. Наиболее важным здесь является зависимость вероятности ошибки на бит скрываемых данных от вероятности ошибки на бит в основном канале связи. Установлено, что при вероятности ошибки на бит в канале связи хуже  $10^{-5}$  скрываемые данные извлекаются со значительными ошибками.

#### Заключение

Обобщение результатов оценивания скрытности встраивания и достоверности приема позволило сформировать следующую ключевую информацию, при которой достигается максимизация пропускной способности скрытого канала при выполнении требований к скрытности встраивания и достоверности приема:

Размер блока  $N=64$ ;

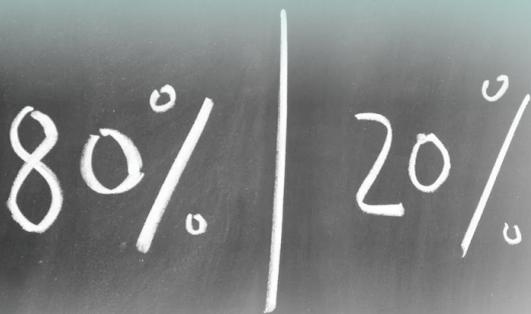
- $E$ -ДШСК Ф-У;
  - $W$ -ОрП Уолша;
  - Номера заменяемых бит коэффициентов ОрП  $b=5,6$
  - Критерий пригодности  $t=5\%$  нулевых пикселей в строке;
  - Качество сжатия  $q=94$ ;
  - $P_{\text{ош}}$  в открытом канале не хуже  $10^{-5}$ .
- Выбор такого варианта встраивания позволил:
- до четырех раз увеличить пропускную способность скрытого канала, за счет использования ДШСК меньшей избыточности ( $N=64$ );
  - избежать возникновения ошибок в скрытом канале за счет реализации адаптивного встраивания;
  - впервые определить требования по достоверности приема в открытом канале связи, по которому будет передаваться видео-контейнер.

#### Литература

1. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. М.: Солон-Пресс, 2002. 272 с.
2. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: МК-Пресс, 2006. 283 с.
3. Абазина Е.С., Ерунов А.А. Цифровая стеганография: состояние и перспективы // Системы управления, связи и безопасности, 2016. № 2. С. 182-201.
4. Абазина Е.С., Ерунов А.А. Результаты моделирования метода скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных // Системы управления, связи и безопасности, 2015 №2. С. 1-25.
5. ГОСТ 26320-84 Оборудование телевизионное студийное и внестудийное. Методы субъективной оценки качества цветных телевизионных изображений. М.: Изд-во стандартов, 1985. 8 с.
6. ГОСТ Р 52722-2007 Каналы передачи цифровых телевизионных сигналов. Основные параметры и методы измерений. М.: Стандартинформ, 2007. 18 с.

$\epsilon$ ОСШП при ФМ-4, дБ	$>9,5$	9,3	8,2	$<8,2$
$P_{\text{ош}}$ в канале связи	$<10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-4}$	$>2 \times 10^{-4}$
изображение				Файл не открывается
$P_{\text{ош}}$ скр. данных	$4 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-3}$	0,4	-

**Рис. 10.** Оценивание помехоустойчивости скрываемых данных в канале связи с помехами



### Евгений Александрович Новиков

доктор технических наук, доцент  
начальник кафедры сетей и систем связи космических комплексов  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (911) 218-51-19  
E-mail: novikov.evg.al@gmail.ru

### Салават Халилович Зиннуров

кандидат технических наук  
начальник лаборатории Военного института (научно-исследовательского)  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (981) 781-71-29  
E-mail: zinnurov\_salavat@mail.ru

УДК 621.396

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАРЕТО-ПОТОКА НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИПЕРДЕЛЬТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

### SIMULATION OF THE PARETO FLOW SERVICE PROCESS BASED ON THE APPLICATION OF HYPERDELTA APPROXIMATION

#### Аннотация

В статье предложена модель одноканальной системы массового обслуживания с Парето распределением длительности интервала времени между пакетами поступающего трафика. В основу модели положено использование преобразований Лапласа для изображения вероятностей состояний системы, а также применение принципа вероятностного баланса при составлении уравнений для изображений вероятностей состояний одноканальной системы. Определены условные вероятности переходов, определяющие дальнейшее движение случайного процесса. Проведена гипердельтная аппроксимация распределения длительности интервалов времени между пакетами трафика. Применение метода гипердельтной аппроксимации позволило получить приближенную аппроксимацию функции плотности Парето распределения в виде суперпозиции дельта-функций распределения, что позволяет использовать аппарат конечных марковских цепей для расчета параметров системы массового обслуживания.

**Ключевые слова:** система массового обслуживания, Парето распределение, метод аппроксимации.

#### Summary

The article proposes a model of a single-channel queuing system with a Pareto distribution of the duration of the time interval between packets of incoming traffic. The model is based on the use of Laplace transformations to depict the probabilities of states of the system, as well as the application of the principle of probabilistic balance in the formulation of equations for images of probabilities of states of a single-channel system. Conditional probabilities of transitions that determine the further movement of a random process are determined. Using the method of moments, the coefficients of the hyperdelt approximation of the Pareto distribution density are determined. Hyperdelt approximation of the distribution of the duration of time intervals between traffic packets is carried out. The application of the hyperdelt approximation method made it possible to obtain an approximate approximation of the Pareto distribution density function in the form of a superposition of delta distribution functions, which, in turn, allows using the finite Markov chains apparatus to calculate the parameters of a queuing system.

**Keywords:** queuing system, Pareto distribution, approximation method.

#### Введение

Текущий уровень научно-технического развития характеризуется широким применением инфотелекоммуникационных технологий во всех сферах жизни общества. При этом наблюдается ситуация одновременного наращивания возможностей систем связи (пропускной способности каналов связи и производительности устройств коммутации) и возрастания потреб-

ностей конечных пользователей в передаче значительных объемов трафика, предъявляющего достаточно жесткие требования по качеству обслуживания. С увеличением объемов передаваемого трафика и количества приложений, генерирующих разнородный трафик, усложняется структура передаваемых информационных потоков. В этой связи продолжает оставаться актуальной задача эффективного распределе-

ния ресурсов системы связи с учетом сложности структуры трафика.

Описание подходов к моделированию процесса поступления и обслуживания трафика в сетях связи системно изложено в работе О.И. Шелухина [1]. При этом большинство описанных в [1] подходов не могут быть использованы для аналитического решения задачи определения параметров системы обслуживания смоделированного трафика, другими словами, не позволяют для общего случая осуществить расчет минимально необходимой пропускной способности канала связи с учетом требований по вероятности потерь, средней длине очереди в буфере, среднему времени обслуживания в устройстве коммутации. В литературе по исследованию процессов обслуживания трафика [6-8] в современных системах связи сложился подход к оценке степени сложности структуры трафика на основе использования коэффициента вариации  $V=\sigma/m$ , где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение, а  $m$  – математическое ожидание случайной величины длительности интервала времени между последовательными пакетами. При этом считается, что трафик считается «сложным» если коэффициент вариации оказывается больше единицы [1-4]. Среди вероятностных распределений, подходящих для описания трафика со сложной структурой, принято выделять распределение Парето [1-5]. В работе Ю.И. Рыжикова [5] показан вариант численного расчета системы массового обслуживания Парето-потока. Применение схем численного расчета параметров системы массового обслуживания может быть неудобным в ряде случаев, связанных с ограничением временных и вычислительных ресурсов устройств коммутации, а также при формализации задач оптимального выбора параметров таких систем. Работы по адаптации ряда моделей современного мультисервисного трафика к аналитическому решению задачи определения параметров системы его обслуживания проводятся, например, в рамках научной школы С.М. Одоевского [2,3].

С точки зрения теории телетрафика аналитический расчет системы обслуживания трафика с временем обслуживания, распределенным по закону Парето распределения, существенно затруднен. В тоже время, известен подход, позволяющий получить приближенную аппроксимацию произвольной функции плотности

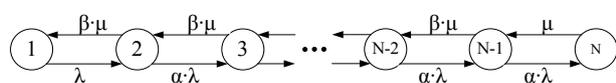


Рис. 1. Граф состояний одноканальной системы обслуживания

распределения суперпозицией дельта-функций распределения [6,7,8], разработанный В.А. Смагиным. Применение такого подхода к аппроксимации функции плотности Парето-распределения открывает широкие возможности к аналитическому расчету и синтезу систем обслуживания трафика со сложной структурой.

## Приближенная аппроксимация распределения Парето

В настоящей работе представлен подход к расчету немарковской модели одноканальной нестационарной системы с Парето-распределением длительностей поступления потока пакетов. Для одноканальной системы массового обслуживания граф состояний и переходов представлен на *рисунке 1*.

В представленном графе длительности интервалов между поступлением последовательных пакетов трафика являются случайными величинами, распределенными по Парето закону, а длительности обслуживания пакетов (интервал времени передачи пакета по каналу связи) являются случайными величинами, распределенными в соответствии с экспоненциальным законом. Соответствующие плотности распределения представлены следующими выражениями:

$$a(t) = \frac{kx_m^k}{t^{k+1}} \text{ и } b(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (1)$$

где  $k$  – параметр формы распределения Парето;  $x_m$  – параметр масштаба распределения Парето;  $\mu$  – параметр обслуживания потока;  $\alpha$  и  $\beta$  – условные вероятности переходов.

Выражение для коэффициента вариации распределения Парето имеет вид:

$$v = \sqrt{1/(k(k-2))},$$

откуда очевидно, что  $V > 1$  при  $2 < k < 1 + \sqrt{2}$ .

В работе [7] показано, что можно построить граф, аналогичный графу на *рисунке 1*, но с использованием изображений Лапласа, и строить уравнения баланса не относительно вероятностей пребывания системы обслуживания в том или ином состоянии, а относительно изображений Лапласа этих вероятностей как показано на *рисунке 2*, где символы \* и  $s$  означают изображение Лапласа и комплексную переменную Лапласа,  $a^*(s)$  – изображение Лапласа функции плотности Парето распределения,  $b^*(s)$  – изображение Лапласа функции плотности экспоненциального распределения.

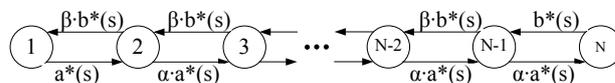


Рис. 2. Граф состояний одноканальной системы обслуживания в изображениях Лапласа

Далее для аналитического расчета вероятностей состояний графа, представленного на рисунке 2, необходимо определить условные вероятности переходов, определяющие дальнейшее движение случайного процесса. Пусть плотностям вероятности интервалов времени поступления и обслуживания пакетов трафика соответствуют следующие функции распределения:

$$A(t) = \int_0^t a(z) dz \text{ и } B(t) = \int_0^t b(z) dz. \quad (2)$$

Тогда условная вероятность перехода системы в следующее состояние, заключающееся или в поступлении новой заявки или в обслуживании текущей, будет определяться следующим образом:

- условная вероятность поступления новой заявки

$$\alpha = \int_0^{\infty} (1-B(x)) dA(x) = \int_0^{x_m} [1 - (1 - e^{-\mu x})] dx + \int_{x_m}^{\infty} [1 - (1 - e^{-\mu x})] \frac{kx_m^k}{x^{k+1}} dx, \quad (3)$$

- условная вероятность обслуживания текущей заявки

$$\beta = \int_0^{\infty} (1-A(x)) dB(x) = \int_0^{x_m} \mu e^{-\mu x} dx + \int_{x_m}^{\infty} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x_m^k}{x^k} \right) \right] \mu e^{-\mu x} dx, \quad (4)$$

где  $A(x) = 1 - \left( \frac{x_m^k}{x^k} \right)$  и  $B(x) = 1 - e^{-\mu x}$  – функции Парето-распределения и экспоненциального законов, соответственно.

Система уравнений баланса для графа состояний одноканальной системы, представленной в изображениях Лапласа, строится аналогично обычной системе уравнений и выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} a^*(s)P_1^*(s) = \beta b^*(s)P_2^*(s); \\ (\alpha a^*(s) + \beta b^*(s))P_2^*(s) = a^*(s)P_1^*(s) + b^*(s)P_3^*(s); \\ \vdots \\ b^*(s)P_N^*(s) = \alpha a^*(s)P_{N-1}^*(s); \\ \sum_{i=0}^N P_i^*(s) = \frac{1}{s}. \end{cases} \quad (5)$$

где  $\sum_{i=0}^N P_i^*(s) = \frac{1}{s}$  – условие нормирования изображений вероятностей.

Решение системы уравнений (5) дает выражения для вероятностей состояний системы в изображениях Лапласа. Решив систему уравнений (5), получим:

$$\begin{cases} P_1^*(s) = \frac{1}{s} \left[ 1 + \frac{\alpha^{N-2} a^*(s)^{N-1}}{\beta^{N-2} b^*(s)^{N-1}} + \sum_{i=1}^{N-2} \frac{\alpha^{i-1} a^*(s)^i}{\beta^i b^*(s)^i} \right]^{-1}; \\ P_2^*(s) = \frac{1}{s} \left[ \frac{\beta b^*(s) + \alpha^{N-2} a^*(s)^{N-2}}{a^*(s)} + \frac{\alpha^{N-2} a^*(s)^{N-2}}{\beta^{N-3} b^*(s)^{N-2}} + \sum_{i=1}^{N-2} \left( \frac{\alpha a^*(s)}{\beta b^*(s)} \right)^{i-1} \right]^{-1}; \\ \vdots \\ P_{N-3}^*(s) = \frac{1}{s} \left[ \frac{\beta^{N-n} b^*(s)^{N-n}}{\alpha^{N-n-1} a^*(s)^{N-n}} + \frac{\alpha^{n-1} a^*(s)^{n-1}}{\beta^{n-2} b^*(s)^{n-1}} + \sum_{i=1}^{N-2} \left( \frac{\alpha a^*(s)}{\beta b^*(s)} \right)^{n-1-i} \right]^{-1}; \\ \vdots \\ P_{N-1}^*(s) = \frac{1}{s} \left[ \frac{\alpha a^*(s) + \beta^{N-2} b^*(s)^{N-2}}{b^*(s)} + \frac{\beta^{N-2} b^*(s)^{N-2}}{\alpha^{N-3} a^*(s)^{N-2}} + \sum_{i=1}^{N-2} \left( \frac{\beta b^*(s)}{\alpha a^*(s)} \right)^{i-1} \right]^{-1}; \\ P_N^*(s) = \frac{1}{s} \left[ 1 + \frac{\beta^{N-2} b^*(s)^{N-1}}{\alpha^{N-2} a^*(s)^{N-1}} + \sum_{i=1}^{N-2} \frac{\beta^{i-1} b^*(s)^i}{\alpha^i a^*(s)^i} \right]^{-1}; \\ \sum_{i=0}^N P_i^*(s) = \frac{1}{s}. \end{cases} \quad (6)$$

Для получения выражений для функций плотностей Парето и экспоненциального распределений воспользуемся подходом на основе гипердельтной аппроксимации произвольных плотностей распределений, разработанным В.А. Смагиным, и достаточно подробно изложенным в работах [4,6]. Для этого необходимо определить первые три начальных момента используемых распределений:

для Парето распределения –

$$v_1 = \frac{kx_m^k}{k-1}; v_2 = \frac{(kx_m^k)^2}{k-2}; v_3 = \frac{(kx_m^k)^3}{k-3}, \quad (7)$$

для экспоненциального распределения –

$$v_1 = \frac{1}{\mu}; v_2 = \frac{2}{\mu^2}; v_3 = \frac{6}{\mu^3}, \quad (8)$$

Соотношения для поиска коэффициентов гипердельтной аппроксимации плотностей используемых распределений определяются с использованием метода моментов путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = 1; \\ C_1 T_1 + C_2 T_2 = v_1; \\ C_1 T_1^2 + C_2 T_2^2 = v_2; \\ C_1 T_1^3 + C_2 T_2^3 = v_3, \end{cases} \quad (9)$$

и имеют следующий вид:

$$C_1 = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{(3v_2 v_1 - v_3 - 2v_1^3)}{\sqrt{v_3^2 - 6v_3 v_2 v_1 - 3v_2^2 v_1^2 + 4v_3 v_1^3 + 4v_2^3}} \right]; \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{(3v_2 v_1 - v_3 - 2v_1^3)}{\sqrt{v_3^2 - 6v_3 v_2 v_1 - 3v_2^2 v_1^2 + 4v_3 v_1^3 + 4v_2^3}} \right];$$

$$T_1 = \frac{v_3 - v_2 \cdot v_1 - \sqrt{v_3^2 - 6v_3 v_2 v_1 - 3v_2^2 v_1^2 + 4v_3 v_1^3 + 4v_2^3}}{2(v_2 - v_1^2)}; \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{v_3 - v_2 v_1 + \sqrt{v_3^2 - 6v_3 v_2 v_1 - 3v_2^2 v_1^2 + 4v_3 v_1^3 + 4v_2^3}}{2(v_2 - v_1^2)}.$$

При осуществлении гипердельтной аппроксимации может сложиться ситуация, когда параметры аппроксимации получаются отрицательными. Для этого случая в работе [8] проведена коррекция гипердельтной аппроксимации и окончательно выражение плотности вероятности используемых законов распределений определяются в соответствии с соотношением:

$$f_{ан}(t) = C_1 \Delta(t - T_1) + C_2 \Delta(t - T_2), \quad (12)$$

где  $\Delta(t - T)$  – дельта-функция Дирака со смещением  $T$ .

Применяя преобразование Лапласа к выражениям аппроксимированных функций плотностей в соответствии с соотношением (12), получим следующие выражения для аппроксимированных формул плотностей вероятностей в изображениях Лапласа:

$$a^*(s) = L[f_{ан}^{Pa}(t)] = C_1^{Pa} e^{-T_1^{Pa} s} + C_2^{Pa} e^{-T_2^{Pa} s}; \quad (13)$$

$$b^*(s) = L[f_{ан}^{exp}(t)] = C_1^{exp} e^{-T_1^{exp} s} + C_2^{exp} e^{-T_2^{exp} s}. \quad (14)$$

От выражений (12)-(13), полученных относительно переменной Лапласа можно перейти обратно к выражениям относительно переменной времени  $t$  с использованием формулы Алфрея, получаемой из формулы Уайдера [5] с учетом свойства фильтрации преобразования Лапласа:

$$f(t) \approx sf^*(t) \text{ при } s = \frac{1}{t}. \quad (15)$$

Для решения системы уравнений баланса (6) необходимо рассчитать значения параметров для условных вероятностей (3)-(4). Далее выражения для плотностей распределений в изображениях Лапласа (13)-(14) подставляем в систему уравнений (6), приводим подобные, и производим замену переменной в соответствии с правилом (15). Решение системы уравнений (6) позволит получить конечные значения вероятностей состояний системы не только в стационарном режиме, но и в переходных нестационарных режимах.

### Пример расчета системы массового обслуживания Pa/M/1/4

На примере одноканальной системы массового обслуживания Pa/M/1/4 представим вывод конечных соотношений для определения зависимости вектора вероятностей системы от времени. Поток поступающих заявок распределен по закону Парето с параметрами  $k=2.3$ ,  $x_m=0.002$ , а время необходимое для обслуживания заявок принято случайной величиной, распределен-

ной по экспоненциальному закону с параметром  $\mu=410\text{c}^{-1}$ . В данном примере параметры системы обслуживания подобраны таким образом, чтобы обеспечивать вероятность отказа (вероятность потерь пакетов) на уровне не более 0.01.

В соответствии с (3) и (4) найдем условные вероятности перехода системы в соседние состояния:

$$\alpha = \int_0^{0.002} [1 - (1 - e^{-410x})] dx + \int_{0.002}^{\infty} [1 - (1 - e^{-410x})] \frac{2.3 \cdot 0.002^{2.3}}{x^{3.3}} dx = 0.02; \quad (16)$$

$$\beta = \int_0^{0.002} 410 \cdot e^{-410x} dx + \int_{0.002}^{\infty} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{0.002^{2.3}}{x^{2.3}} \right) \right] \cdot 410 \cdot e^{-410x} dx = 0.98. \quad (17)$$

Далее находим значения первых трех моментов используемых распределений. С использованием метода моментов и путем решения системы уравнений (9) найдем параметры гипердельтной аппроксимации:

- для Парето распределения  $C_1^{Pa}=0.9311$ ,  $C_2^{Pa}=0.0689$ ,  $T_1^{Pa}=-0.0121$ ,  $T_1^{Pa}=-0.0121$ ;

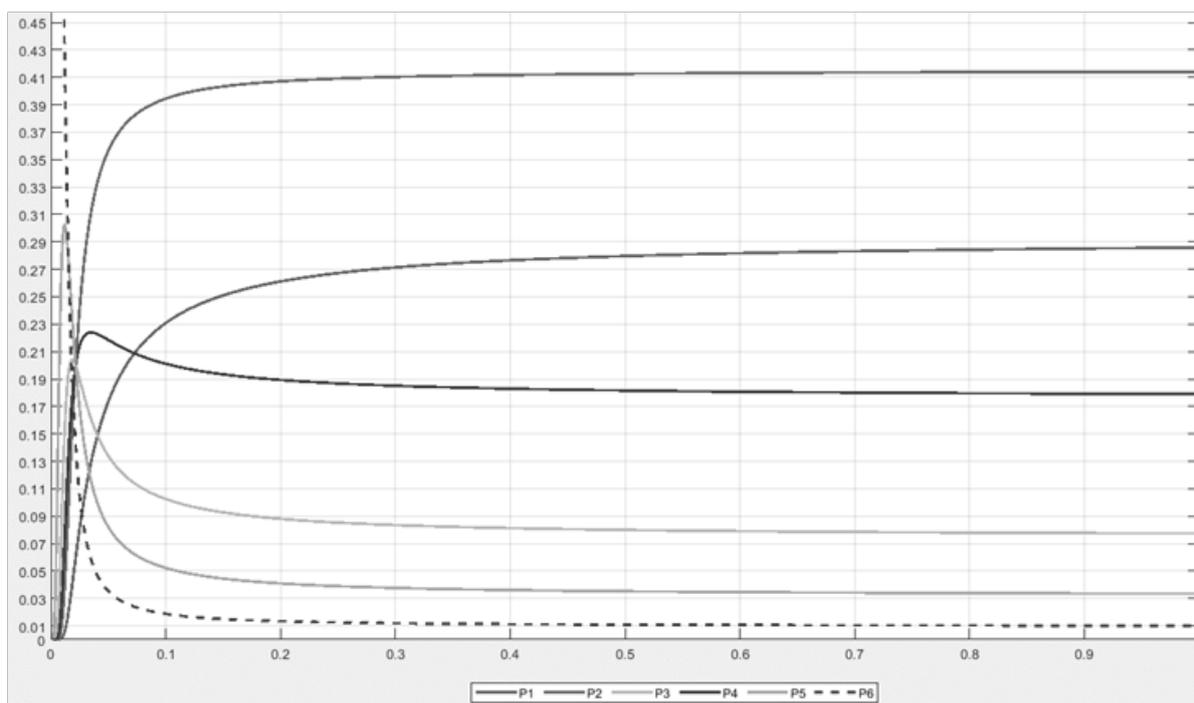
- для экспоненциального распределения  $C_1^{\text{exp}}=0.1464$ ,  $C_2^{\text{exp}}=0.8536$ ,  $T_1^{\text{exp}}=0.0014$ ,  $T_2^{\text{exp}}=0.0083$ .

Затем получим выражения аппроксимированных плотностей соответствующих вероятностей:

$$a^*(s) = L[f_{\text{ан}}^{Pa}(t)] = 0.0689e^{-0.0047s},$$

$$b^*(s) = L[f_{\text{ан}}^{\text{exp}}(t)] = 0.1464e^{-0.0014s} + 0.839e^{-0.0083s}.$$

Далее выражения для плотностей распределений в изображениях Лапласа (13)-(14) подставляем в систему уравнений (6), приводим подобные, и производим замену переменной



**Рис. 3.** Вероятности состояний одноканального процесса, полученные при помощи гипердельтной аппроксимации, где пунктирной линией представлена вероятность потери пакетов

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

в соответствии с правилом (15). Тогда система уравнений вероятностей состояний примет вид:

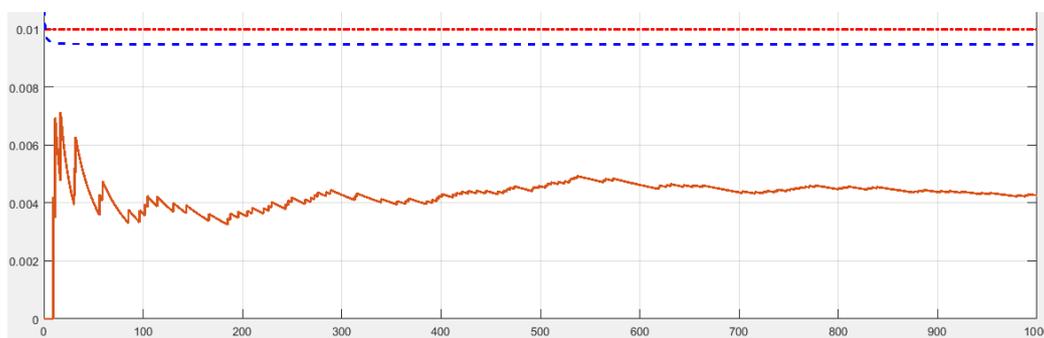
$$\begin{cases} P_1(t) = \left[ 1 + \frac{1.42c_1(t)}{c_2(t)} + \frac{0.604c_1^2(t)}{c_2^2(t)} + \frac{0.256c_1^3(t)}{c_2^3(t)} + \frac{0.109c_1^4(t)}{c_2^4(t)} + \frac{0.0324c_1^5(t)}{c_2^5(t)} \right]^{-1}; \\ P_2(t) = \left[ 1 + \frac{0.298c_1(t)}{0.703c_2(t)} + \frac{0.089c_1^2(t)}{0.494c_2^2(t)} + \frac{0.026c_1^3(t)}{0.347c_2^3(t)} + \frac{0.023c_1^4(t)}{0.244c_2^4(t)} + \frac{c_2(t)}{c_1(t)} \right]^{-1}; \\ P_3(t) = \left[ 1 + \frac{5.536c_2^2(t)}{c_1^2(t)} + \frac{0.127c_1^2(t)}{0.494c_2^2(t)} + \frac{3.9c_2^3(t)}{c_1^3(t)} + \frac{0.298c_1(t)}{0.703c_2(t)} + \frac{2.35c_2(t)}{c_1(t)} \right]^{-1}; \\ P_4(t) = \left[ 1 + \frac{0.089c_1^2(t)}{0.494c_2^2(t)} + \frac{0.82(c_2(t)+c_3(t))^2}{0.127c_1^2(t)} + \frac{0.053c_1^3(t)}{0.347c_2^3(t)} + \frac{0.298c_1(t)}{0.703c_2(t)} + \frac{2.35c_2(t)}{c_1(t)} \right]^{-1}; \\ P_5(t) = \left[ 1 + \frac{5.536c_2^2(t)}{c_1^2(t)} + \frac{13.1c_2^3(t)}{c_1^3(t)} + \frac{2.23c_2^4(t)}{c_1^4(t)} + \frac{0.023c_1(t)}{0.244c_2^4(t)} + \frac{2.35c_2(t)}{c_1(t)} \right]^{-1}; \\ P_6(t) = \left[ 1 + \frac{2.36c_2(t)}{c_1(t)} + \frac{3.09c_2^2(t)}{c_1^2(t)} + \frac{6.46c_2^3(t)}{c_1^3(t)} + \frac{10.7c_2^4(t)}{c_1^4(t)} + \frac{5.28c_2^5(t)}{c_1^5(t)} \right]^{-1}, \end{cases}$$

где  $c_1 = 0.069 \cdot e^{-\frac{0.0047}{t}}$ ,  $c_2 = 0.15 \cdot e^{-\frac{0.0014}{t}} + 0.85 \cdot e^{-\frac{0.0083}{t}}$ .

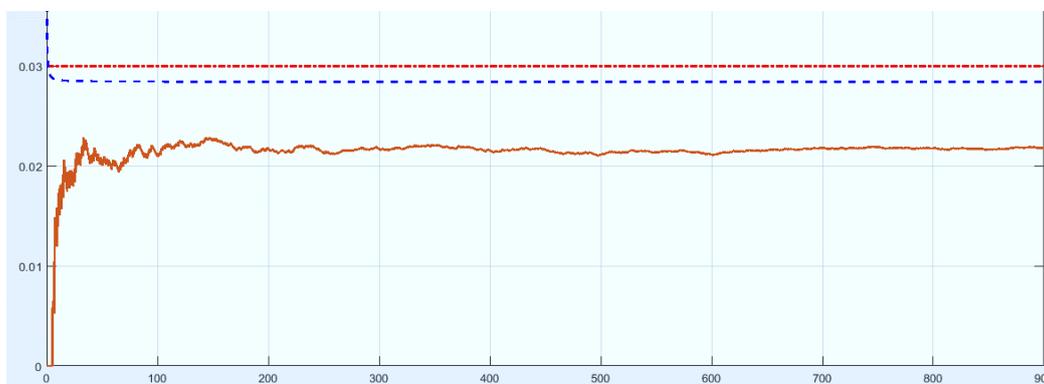
Результаты аналитического моделирования представлены в виде графиков зависимостей вероятностей пребывания системы обслуживания в каждом из состояний на рисунке 3.

Из полученных аналитических выражений можно найти стационарные значения этих вероятностей. В условиях примера они равны  $P_1(\infty) = 0.292$ ,  $P_2(\infty) = 0.4155$ ,  $P_3(\infty) = 0.0749$ ,  $P_4(\infty) = 0.1746$ ,  $P_5(\infty) = 0.0318$ ,  $P_6(\infty) = 0.0095$ .

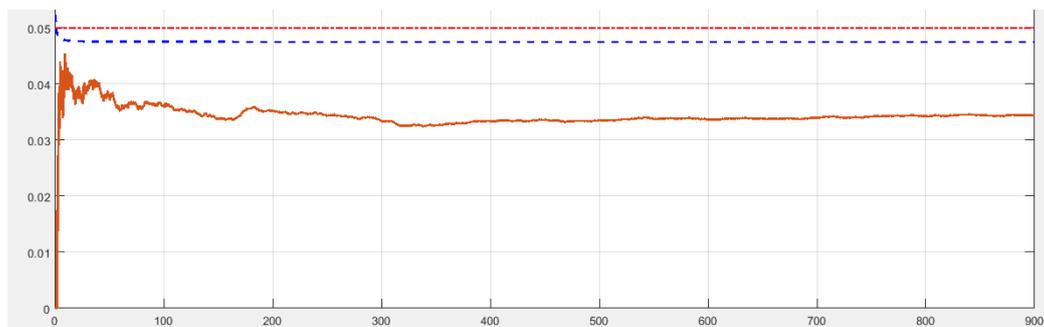
Предложенный подход определения вероятностей состояний системы обслуживания позво-



**Рис. 4а.** Вероятность потери пакетов  $P_{отк} = 0.01$  для одноканальной системы. Штрихпунктирная линия – требуемая вероятность потери, пунктирная линия – вероятность потери пакетов, найденная при помощи гипердельтной аппроксимации, сплошная линия – вероятность потери пакетов, полученная при помощи имитационного моделирования



**Рис. 4б.** Вероятность потери пакетов  $P_{отк} = 0.03$  для одноканальной системы. Штрихпунктирная линия – требуемая вероятность потери, пунктирная линия – вероятность потери пакетов, найденная при помощи гипердельтной аппроксимации, сплошная линия – вероятность потери пакетов, полученная при помощи имитационного моделирования



**Рис. 4в.** Вероятность потери пакетов  $P_{отк} = 0.05$  для одноканальной системы. Штрихпунктирная линия – требуемая вероятность потери, пунктирная линия – вероятность потери пакетов, найденная при помощи гипердельтной аппроксимации, сплошная линия – вероятность потери пакетов, полученная при помощи имитационного моделирования

лит решить одну из традиционных задач теории массового обслуживания, связанную с подбором таких параметров системы обслуживания, которые обеспечивали бы требуемую вероятность отказа  $P_{\text{отк}} \leq 0.01$ , определяемую значением вероятности  $P_N$ , для фиксированных параметров канала (обслуживающего прибора).

### Имитационная модель обслуживания трафика сложной структуры

Для проверки полученных результатов расчета вероятностей состояний (рисунок 3), полученных при помощи гипердельтной аппроксимации, использовалась имитационная модель обслуживания трафика сложной структуры на основе сети массового обслуживания, разработанная с использованием программного продукта Matlab/Simulink/Stateflow. Имитационная модель обслуживания трафика сложной структуры была рассмотрена авторами ранее [4]. Изменения имитационной модели были обусловлены необходимостью создания источника генерации трафика сложной структуры распределенного по закону Парето. При помощи имитационной модели проводились расчеты вероятности потери пакетов для различных исходных данных. В качестве параметра распределения среднего времени обслуживания выбиралось минимальное значение интенсивности, обеспечивающее ограничение потерь пакетов на уровне  $P_{\text{отк}} = 0.01$ ,  $P_{\text{отк}} = 0.03$ ,  $P_{\text{отк}} = 0.05$ . Результаты расчета вероятности потери пакетов для заданного значения интенсивности обслуживания  $\mu = 410 \text{ с}^{-1}$ ,  $\mu = 310 \text{ с}^{-1}$ ,  $\mu = 285 \text{ с}^{-1}$ , представлены на рисунке 4(а-в). Анализ данных, представленных на рисунке 4, говорит о сходимости результатов аналитического расчета вероятности состояний одноканальной системы массового обслуживания, полученные при помощи гипердельтной аппроксимации и результатов имитационного моделирования.

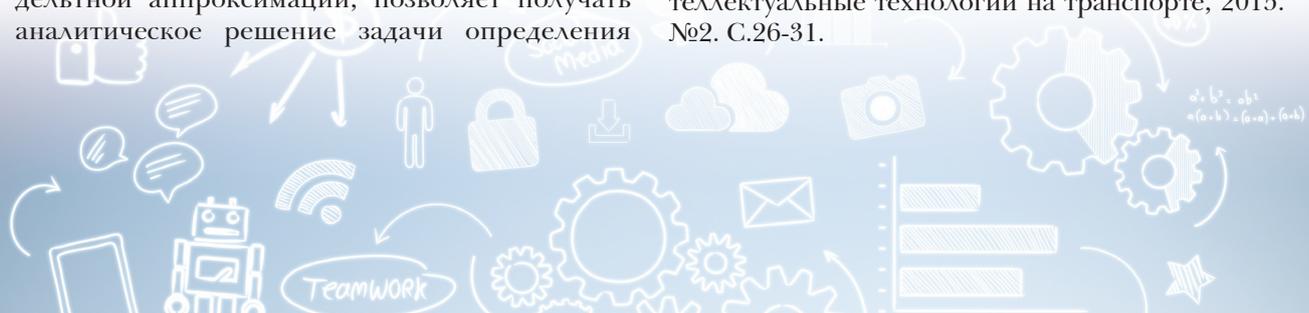
### Заключение

Применение подхода к аппроксимации закона распределения длительности интервала времени между пакетами трафика со сложной структурой, основанного на применении гипердельтной аппроксимации, позволяет получать аналитическое решение задачи определения

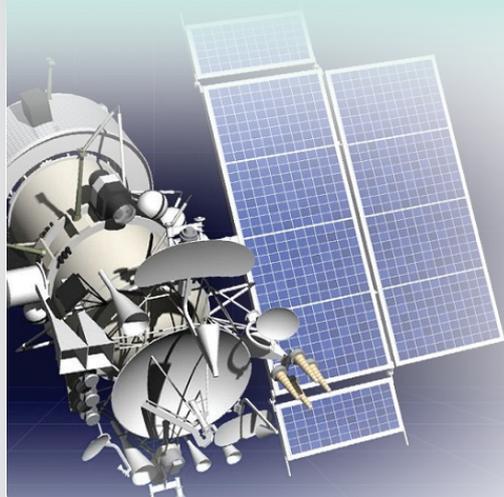
минимальной пропускной способности канала связи (устройства коммутации, сервера). Недостатком применения формула Алфрея для обратного преобразования Лапласа является то, что такой подход позволяет получить высокую точность только для аргументов в начале оси абсцисс. Более высокую точность обратного преобразования Лапласа можно получить, применяя уравнение Винера-Хопфа.

### Литература

1. Шелухин О.И. Мультифракталы. Инфокоммуникационные приложения. М.: Горячая линия-Телеком, 2011. 576 с.
2. Одоевский С.М., Бусыгин А.В. Аналитическая модель обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности, 2020. №1. С.74-108.
3. Одоевский С.М., Абазина Е.С., Бусыгин А.В. Обоснование требований к пропускной способности канала связи для видеотрафика в перспективной мультисервисной сети специального назначения // Труды ВКА им. А.Ф.Можайского, 2020. № 672. С. 68-76.
4. Зиннуров С.Х., Новиков Е.А., Степанова Е.А. Моделирование процессов генерации и обслуживания трафика со сложной структурой с использованием программного комплекса логико-событийного моделирования MATLAB/SIMULINK/STATEFLOW // Труды ВКА им. А.Ф.Можайского, 2020. № 675. С. 69-76.
5. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и распределение Парето // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. № 648.
6. Смагин В.А., Филимоныхин Г.В. О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения // Автоматика и вычислительная техника, 1990. №1. С.25-31.
7. Смагин В.А., Гусеница Я.Н. Моделирование одноканальных нестационарных систем обслуживания, представленных циклическим графом состояний // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2016. Т.59. № 10. С.801-806.
8. Смагин В.А. Коррекция гипердельтного распределения в теории случайных процессов // Интеллектуальные технологии на транспорте, 2015. №2. С.26-31.



## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



УДК 621.396

### ЗАДАЧА ВЫБОРА МОМЕНТА ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВНОГО КАНАЛА ПРИ УГРОЗЕ ПЕРЕГРУЗКИ НАПРАВЛЕНИЯ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В УПРАВЛЕНИИ

### THE PROBLEM OF CHOOSING THE MOMENT OF TURNING ON THE BACKUP CHANNEL IN CASE OF A THREAT OF OVERLOADING THE DIRECTION OF COMMUNICATION, TAKING INTO ACCOUNT THE DELAY IN CONTROL

**Евгений Николаевич Косяков**  
кандидат технических наук, доцент  
профессор кафедры сетей и систем связи космических комплексов ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13  
Тел.: 8 (812) 325-14-15  
E-mail: vka@mil.ru

**Дмитрий Юрьевич Мишин**  
кандидат технических наук  
доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13  
Тел.: 8 (812) 325-14-15  
E-mail: vka@mil.ru

**Андрей Сергеевич Севостьянов**  
адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13  
Тел.: 8 (812) 325-14-15  
E-mail: vka@mil.ru

**Александр Евгеньевич Кондрашин**  
кандидат технических наук  
директор  
Единый отраслевой закупочный центр АО «Организация «АГАТ»  
Адрес: 125047, Москва, ул. Бутырский вал, д. 18, стр. 1  
Тел.: 8(495) 631-90-09 доб. 2612  
E-mail: Kondrashinae@agat-rosocosmos.ru

#### Аннотация

Рассматриваются научно-технические предложения по реализации оперативного резервирования каналов для обеспечения абонентам систем спутниковой связи требуемого качества обслуживания в условиях непредсказуемых колебаний информационного трафика и угрозах возникновения перегрузки направлений связи.

**Ключевые слова:** марковски-модулированный пуассоновский поток, конечная марковская цепь, спутник-ретранслятор, частотно-энергетический ресурс, спутниковая система связи.

#### Summary

Scientific and technical proposals are considered for the implementation of operational channel redundancy to provide subscribers of satellite communication systems with the required quality of service in conditions of unpredictable fluctuations in information traffic and threats of overload of communication directions.

**Keywords:** Markov-modulated Poisson flow, finite Markov chain, repeater satellite, frequency-energy resource, satellite communication system.

#### Введение

Важным преимуществом радиосистем передачи информации, в особенности, систем спутниковой связи (ССС) [1], является возможность оперативного маневра радиоканалами между направлениями связи в соответствии с текущими потребностями абонентов. Особую значимость указанное преимущество приобретает при нестабильности объемов передаваемого трафика на разных направлениях связи, когда периоды с высокой интенсивностью нагрузки (пульсации)

чередуются с периодами низкой нагрузки. Как показывают многочисленные исследования [2-4, 6, 9] информационный трафик в современных телекоммуникационных сетях характеризуется высокой степенью «самоподобия» (фрактальности), что существенно затрудняет плановое распределение частотно-энергетического ресурса [1, 2] (далее, радиоресурса) спутника-ретранслятора (СР) между направлениями связи на долгосрочной основе. Поэтому, при планировании радиоресурса, как правило, ориентируются

на пиковую нагрузку для каждого радионаправления с тем, чтобы обеспечить требуемое качество обслуживания абонентов (Quality of Service, QoS). Однако такой подход заметно снижает эффективность использования ограниченного радиоресурса СР. Альтернативой такому подходу является оперативное подключение резервных каналов на тех направлениях связи, в которых возникает угроза перегрузки вследствие неожиданных пульсаций информационного трафика. В качестве модели «самоподобного» входного потока используется двумерный марковски-модулированный пуассоновский процесс (Markov-modulated Poisson processes [3, 4, 6, 9], далее ММР-поток), управляемый эргодической конечной цепью Маркова (КМЦ). Основным фактором, осложняющим решение задачи оперативного включения каналов при угрозах перегрузки, являются высокие задержки распространения сигналов в спутниковых радиолиниях и, соответственно, запаздывание в управлении резервными каналами [1, 2, 8]. В работе предложена модель процесса обслуживания (передачи) нестационарного (пульсирующего) входного потока сообщений земной станцией спутниковой связи с возможностью подключения (по запросу) резервного канала СР при возникновении угрозы перегрузки в направлении связи.

### Постановка задачи оперативного подключения резервных каналов с учетом запаздывания

При планировании радиоресурса [2] для новых направлений связи необходимо оценивание (прогнозирование) требуемой пропускной способности организуемых каналов, которая определяет предельно достижимую скорость передачи информации ( $C_k$ ). Основным условием передачи планируемого объема информации  $V_k$  без искажения в формируемом канале является выполнение требования:  $C_k \geq V_k$ .

Для «самоподобных» потоков сообщений, поступающих на вход системы передачи информации (СПИ), при планировании пропускной способности организуемых каналов необходимо учесть дополнительный резерв  $\Delta C_k$  сверх  $V_k$ , чтобы компенсировать случайные пульсации информационного трафика и/или неточности прогноза.

Традиционное средство компенсации пульсаций трафика – буферизация сообщений – также используется, но ограничено требованиями к задержке передаваемых сообщений.

Резерв пропускной способности канала  $\Delta C_k$  определяется как уровнем пульсаций передаваемого трафика, так и уровнем допустимых

потерь сообщений. При высоком уровне пульсаций передаваемого трафика требования к запасу  $\Delta C_k$  могут превышать значение  $V_k$  на десятки процентов. Содержание таких запасов радиоресурса в каждом направлении связи в условиях кратковременного повышения интенсивности трафика и ограниченности ресурсов спутника-ретранслятора (СР) является нерациональным.

Альтернативный подход предполагает вместо постоянного поддержания в радионаправлении запаса по скорости  $\Delta C_k$  использование в качестве основного – канала, скорость которого соответствует средней прогнозируемой нагрузке  $C_k \approx V_k$ , а в случае угрозы перегрузки оперативное подключение резервного канала с аналогичными характеристиками. Основная сложность применения предложенного подхода состоит в том, как определить момент, когда возникает угроза перегрузки, и как долго будет подключаться резервный канал с учетом задержки в управлении и настройки параметров канала. Одним из способов фиксации момента возникновения угрозы перегрузки является контроль за уровнем заполнения буфера порта исходящего направления, когда при накоплении в буфере некоторого порогового количества ( $L$ ) сообщений формируется запрос на подключение резервного канала. Поэтому задача выбора момента включения дополнительного канала при угрозе перегрузки с учетом запаздывания может быть сформулирована так: определить максимальное пороговое значение  $L$ , при котором QoS не выйдет за пределы нормы с учетом случайной задержки в подключении резервного канала.

Дополнительно возникает задача технико-экономического обоснования соотношения стоимости аренды каналов в долгосрочной и кратковременной перспективе с учетом того, что оперативный маневр каналами потребует более сложных операций управления связью.

В работе представлен вариант поиска возможного решения поставленной задачи на основе построения математической модели канала передачи сообщений с возможностью подключения дополнительного резервного канала при определенном уровне ( $L$ ) заполнения буфера общей емкостью  $R$ . В качестве модели пульсирующего входного потока сообщений используется двумерный ММР-поток [3, 4], который может находиться в двух состояниях: состоянии  $A$ , которое соответствует периоду пульсации с высокой интенсивностью нагрузки  $\lambda_1$ , и в состоянии  $S$  (пауза), которое соответствует периоду с низкой интенсивностью нагрузки  $\lambda_2$ . Продолжительность периодов пребывания ММР-процесса в состояниях  $A$  и  $S$  являются случайными

величинами с экспоненциальным законом распределения и средними значениями  $T_a$  и  $T_s$  соответственно.

### Разработка математической модели оперативного подключения резервных каналов с учетом запаздывания

В качестве прототипа разрабатываемой модели рассмотрим одноканальную систему массового обслуживания с аналогичным входным ММР-потокком [3, 6] и ограниченным буфером  $R$  без резервирования, но с постоянным резервом  $\Delta C_k$  для поддержания необходимого QoS. Для оценки QoS поступающего трафика будем использовать вероятность потери сообщения (пакета) при переполнении буфера. Будем полагать, что емкость буфера  $R$  одинакова для обеих моделей, чтобы уравнивать условия по задержке и потерям сообщений. Входящий ММР-поток в обеих моделях имеет одинаковые интенсивности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (сообщений в единицу времени) в течение периодов пульсации ( $T_a$ ) и паузы ( $T_s$ ). Средняя интенсивность для обеих моделей также полагается одинаковой:

$$\lambda = (\lambda_1 T_a + \lambda_2 T_s) / (T_a + T_s).$$

Если средний объем сообщений, передаваемых в единицу времени, составляет  $\nu$  бит, тогда средняя скорость передачи информации в направлении связи составит  $V_{kr} = \lambda \nu$ , (бит/с).

Если скорость передачи в канале  $C_k = V_k + \Delta C_k$ , то среднее время обслуживания сообщения составит  $b = \nu / C_k$  (с).

Предположим, что время передачи одного сообщения является величиной случайной с экспоненциальным законом распределения. Тогда модель канала передачи с ограниченным буфером (емкостью  $R$ ) и входным ММР-потокком с двумя состояниями может быть представлена в виде двумерной конечной марковской цепи (КМЦ) [5] с числом состояний  $2(R+2)$ , граф состояний которой представлен на *рисунке 1*, где  $\mu = 1/b$  – интенсивность обслуживания (передачи) сообщений.

Состояния нижнего яруса  $\{p_{i,1}, i=0, \dots, R+2\}$

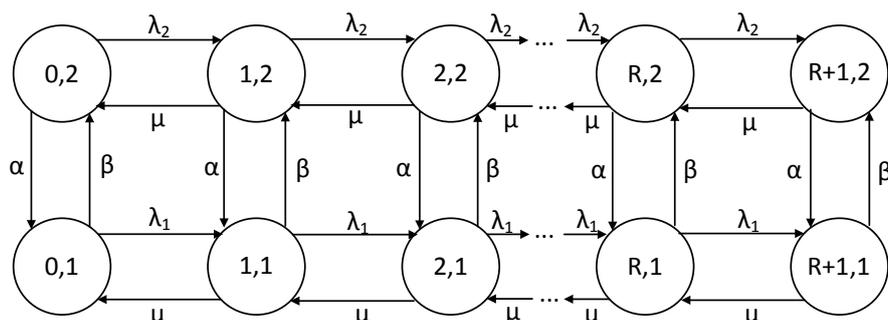
соответствуют пребыванию ММР-потока в состоянии  $A$  (пульсация), а состояния верхнего яруса  $\{p_{i,2}, i=0, \dots, R+2\}$  соответствуют пребыванию ММР-потока в состоянии  $S$  (пауза). Стационарные вероятности состояний  $\{p_{ij}\}$  для представленной КМЦ могут быть рассчитаны достаточно просто по известным методикам [5,7,8]. Для оценки QoS используется вероятность потери сообщений, что эквивалентно вероятности заполнения буфера, т.е. сумме вероятностей состояний при  $i=R+1$ . Тогда, зная требования к QoS, может быть определена необходимая интенсивность обслуживания  $\mu$ , а следовательно, и скорость передачи информации  $C_k = \mu \nu$  бит/с. При этом резерв пропускной способности составит  $\Delta C_k = C_k - V_k$ .

Принимая за 100% необходимую пропускную способность канала для передачи информации объемом  $V_k$  без учета пульсации, следует что в интересах обеспечения требуемого QoS в период пульсации трафика с высокой интенсивностью нагрузки необходимо предусмотреть наличие резерва пропускной способности  $(\Delta C_k / V_k) 100\%$ . Эффективность такого решения ( $\Theta_1$ ) может быть оценена отношением увеличения задействованной пропускной способности канала для передачи трафика в условиях пиковой нагрузки к объему передаваемого трафика без учета пульсаций  $V_k$ :

$$V_k : \Theta_1 \frac{(V_k + \Delta C_k)}{V_k} 100\%,$$

т.е. по существу, коэффициент  $\Theta_1$  показывает, насколько надо увеличить скорость передачи в канале, чтобы передавать пульсирующий трафик с допустимым уровнем потерь.

При построении модели альтернативного варианта [8] (с оперативным включением дополнительного канала при угрозе перегрузки) будем считать, что пропускная способность канала выбрана в соответствии с прогнозируемой (измеренной) средней скоростью поступающего трафика:  $C_k \approx V_k$ . Далее, будем полагать, что критерием возникновения угрозы перегрузки служит уровень заполнения буфера сообщениями  $L (1 < L < R)$ , при котором отправляется запрос на



**Рис. 1.** Граф состояний КМЦ для одноканальной системы с двумерным входным ММР-потокком и буфером емкостью  $R$

подключение и настройку дополнительного канала. На это требуется случайное время  $T_3$ , распределенное по экспоненциальному закону со средним значением  $z$ .

После передачи всех сообщений из буфера, арендованный резервный канал освобождается, а система переходит в исходный одноканальный режим.

Процесс обслуживания сообщений в СПИ с возможностью подключения резервного канала может быть представлен в виде трехмерной КМЦ, граф которой представлен на *рисунке 2*.

Первое измерение КМЦ (первый индекс состояний) соответствует количеству сообщений в СПИ. Для сокращения числа индексов состояний при обозначении состояний ММР-процесса используется второй индекс, причем четное значение соответствует состоянию  $S$  (паузы), а нечетное – состоянию  $A$  (пульсации). Верхний уровень КМЦ (состояния с индексами  $(i, 1)$  и  $(i, 2)$  при  $i=0, \dots, R+1$ ) соответствует одноканальному режиму функционирования СПИ, а нижний уровень (состояния с индексами  $(i, 3)$  и  $(i, 4)$  при  $i=2, \dots, R+2$ ) – двухканальному режиму. При достижении уровня заполнения буфера значения  $L$  формируется запрос на включение второго (резервного) канала, что соответствует переходам КМЦ в нижний ярус состояний (с интенсивностью  $\gamma$ ). Поскольку полагается (в качестве допущения), что переход в двухканальный режим занимает некоторое случайное время с экспоненциальным распределением вероятностей (при среднем значении  $z$ ), то интенсивность переходов в нижний ярус  $\gamma=1/z$ . В двухканальном режиме интенсивность обслуживания удваивается ( $2\mu$ ) и сохраняется до полного освобождения буфера, после чего второй канал отключается.

Задача состоит в том, чтобы определить максимальное (чтобы сократить время аренды дополнительного канала) значение  $L$ , при котором следует подключать дополнительный канал для

обеспечения требуемого QoS (уровня потерь).

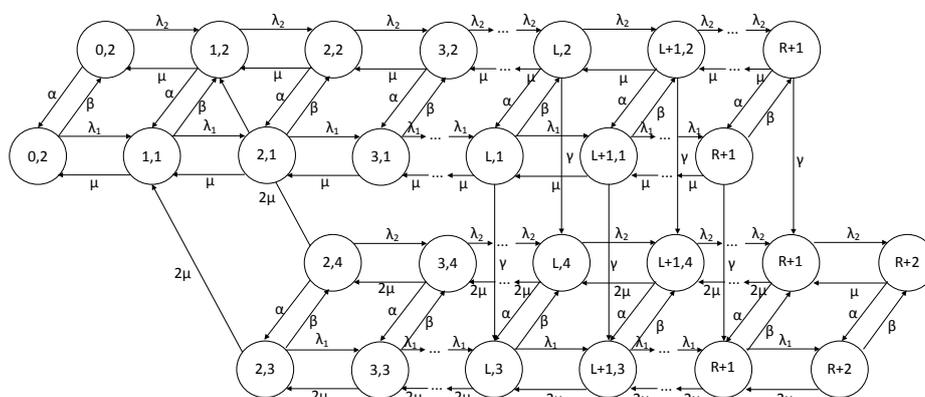
Выбор момента формирования запроса на подключение резерва (величина  $L$ ), в первую очередь, зависит от задержки включения и настройки дополнительного канала  $z$ , а во вторую очередь, от емкости буфера. В связи с этим необходимо оценить, как влияет оперативность подключения дополнительного канала (задержка  $z$ ) на эффективность предложенного подхода.

Для представленной трехмерной КМЦ (*рисунк 2*) существует установившийся режим равновесия [5], для которого могут быть рассчитаны стационарные вероятности состояний ( $p_{ij}$ ,  $i=0, \dots, R+2$ ;  $j=1, \dots, 4$ ), с помощью которых возможно оценивать показатели качества модели в зависимости от выбранного порога  $L$ . Поскольку множество возможных значений  $L$  ограничено емкостью буфера, т.е.  $L \in \{2, \dots, R+1\}$ , то критерием выбора является максимальное значение  $L$ , при котором показатель QoS остается в пределах нормы. Например, в современных СПИ вероятность потери сообщения (пакета) нормируется на уровне 1% [1].

### Итерационный метод расчета многомерной конечной марковской цепи для модели оперативного подключения резервных каналов с учетом запаздывания

При расчете вероятностей состояний многомерных КМЦ в установившемся режиме получил распространение итерационный векторно-матричный метод [7]. Однородность и неприводимость представленной трехмерной КМЦ (*рисунк 2*) гарантирует [5] существование установившегося режима и стационарного распределения вероятностей состояний при любых значениях интенсивностей переходов.

Обозначим через  $\mathbf{p}_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ij}\}$  векторы-строки вероятностей состояний  $(i, j)$ , где  $i=0, \dots, R+2$  выступает в роли индекса укрупненных состояний и обозначает количество



**Рис. 2.** Граф КМЦ для одноканальной системы с входным ММР-потокм, буфером емкостью  $R$  и подключением резервного канала при заполнении буфера до уровня  $L$

сообщений в системе, а  $j=\{1, \dots, 4\}$  – номера микросостояний, соответствующих состояниям ММР-процесса (нечетные – пульсация, четные – пауза) и режиму каналов ( $j=1, 2$  – одноканальный режим,  $j=3, 4$  – двухканальный режим). Тогда уравнения баланса переходов между состояниями могут быть записаны в виде системы векторно-матричных уравнений:

$$\begin{aligned} p_0 D_0 &= p_1 B_1 + p_0 C_0; \\ p_i D_i &= p_{i-1} A_{i-1} + p_{i+1} B_{i+1} + p_i C_i; \\ p_{R+2} D_{R+2} &= p_{R+1} D_{R+1} + p_{R+2} C_{R+2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A_i, B_i, C_i, D_i$  – матрицы размерностью  $(4 \times 4)$  интенсивностей переходов при прибытии сообщений (вправо), при завершении обслуживания (влево), внутри  $i$ -го состояния и интенсивностей ухода из  $i$ -го состояния соответственно.

Путем несложных преобразований данную систему можно представить в виде, удобном для решения с помощью матричного процессора MATLAB:

$$\begin{aligned} p_0 &= p_1 B_1 (C_0 - D_0)^{-1}; \\ p_i &= (p_{i-1} A_{i-1} + p_{i+1} B_{i+1}) (C_i - D_i)^{-1}, \quad i=1, \dots, R+1; \\ p_{R+2} &= p_{R+2} A_{R+2} (C_{R+2} - D_{R+2})^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Применяя к указанной системе векторно-матричных уравнений итерационную схему [7] последовательных приближений, основанную на численном методе Гаусса-Зейделя, можно рассчитать стационарные вероятности состояний многомерной КМЦ с любой заданной точностью. Итерационная схема последовательных приближений работает при любом начальном приближении, поэтому наиболее простым начальным приближением из условия нормировки ( $\sum p_{ij} = 1$ ) может служить равномерное приближение:  $p_{ij} = 1/4/(R+2)$ . Однако более быстрая сходимость наблюдается, если в начальном приближении дополнительно учесть, что при одинаковом индексе  $i$  величины вероятностей состояний с четными индексами  $j$  относятся к вероятностям состояний с нечетными индексами  $j$  как длительности периодов паузы ( $T_p$ ) и периодов пульсации ( $T_a$ ) соответственно.

Критерием завершения расчетов и подтверждением корректности полученного решения в представленном примере является совпадение баланса переходов для состояний верхнего и нижнего ярусов, а также баланса между ярусами с четными и нечетными индексами  $j$ , которые соответствуют состояниям ММР-потока (пауза или пульсация).

Вероятность потери сообщений вследствие переполнения буфера для данной модели будет составлять:

$$P_n = p_{R+1,1} + p_{R+1,2} + p_{R+2,3} + p_{R+2,4}, \quad (3)$$

Сумма вероятностей верхнего уровня  $S_1 = \sum (p_{i1} + p_{i2})$  позволяет оценить относительную

долю времени, в течение которого система работает только в одноканальном режиме, а сумма вероятностей нижнего уровня  $S_2 = \sum (p_{i3} + p_{i4})$  – относительную долю времени, когда система работает в двухканальном режиме.

### Результаты моделирования оперативного подключения резервных каналов с учетом запаздывания при обслуживании ММР-потоков сообщений

Для апробации работоспособности предложенного метода рассмотрим процесс обслуживания различных ММР-потоков и оценим эффективность оперативного подключения резервного канала в зависимости от запаздывания управления.

Для характеристики неравномерности ММР-потока будем использовать коэффициент пульсации [3,9]  $K_{\Pi} = \lambda_1/\lambda$ , равный отношению интенсивности поступления сообщений в период пульсации к средней интенсивности. При этом соотношение длительностей периодов пульсации и паузы ( $T_a$  и  $T_p$ ) будем выбирать таким образом, чтобы средняя интенсивность поступления сообщений всегда была равна 1 (т.е. произведем нормировку модельного времени к среднему времени передачи отдельного сообщения ( $b$ ) по стандартному каналу, производительность которого  $\mu = 1/b$  соответствует средней интенсивности поступления сообщений  $\lambda$ ):

$$T_p/T_a = (\lambda_1 - 1)/(1 - \lambda_2). \quad (4)$$

Например, если положить  $\lambda_1 = 2$ , а  $\lambda_2 = 0.5$  ( $K_{\Pi} = 2$ ), то соотношение  $T_p/T_a = 2$ . Для примера выберем среднюю длительность пульсации  $T_a = 15$ , тогда  $T_p = 30$ . Нетрудно заметить, что при условии  $\lambda = 1$ , интенсивность  $\lambda_1$  будет совпадать с  $K_{\Pi}$ . Учитывая, что средний объем пульсации за период  $T_a$  составит  $N_a = \lambda_1 T_a = 30$  сообщений, будем полагать, что емкость буфера исходящего порта выбирается в соответствии с ожидаемым объемом пульсации, т.е.  $R \approx N_a$ . При моделировании зафиксируем объем буфера ( $R = 30$ ) и рассмотрим три варианта входного потока для значений коэффициента пульсации  $K_{\Pi} = 2, 2.5, 3$ . Очевидно, что для значений  $K_{\Pi} > 3$  включение лишь одного дополнительного канала не сможет «погасить» всю пульсацию, в течение которой интенсивность трафика более чем трехкратно превышает производительность типового канала.

Примем цену аренды канала с пропускной способностью  $V_k$  за 100%, а цену экстренной аренды дополнительного канала за 150%. Тогда эффективность работы СПИ в режиме резервирования с временной арендой дополнительного канала оценивается соотношением:

$$\mathcal{E}_2 = (S_1 + 2.5S_2) 100\%. \quad (5)$$

В *таблице 1* приведены результаты моделирования трех вариантов входного ММР-потока для разных значений  $K_{\Pi}$  при условии, что в каждом варианте поддерживается одинаковое QoS (вероятность потерь сообщений нормируется на уровне 0,01).

Для каждого значения запаздывания ( $z$ ) в подключении резервного канала приведено значение  $L$ , определяющее порог заполнения буфера, при достижении которого передается запрос на подключение резервного канала для обеспечения требуемого QoS. Емкость буфера для всех вариантов выбрана одинаковой (в соответствии со средним объемом пульсации  $N_a = \lambda_1 T_a = 30$ ), а среднее заполнение (очередь) буфера  $q$  позволяет судить (с учетом нормировки времени) о задержках ожидания сообщений в буфере.

Ключевым параметром таблицы является средняя задержка подключения резервного канала  $z_{\Pi}$ , нормированная к среднему времени передачи сообщения  $b$ :  $z_{\Pi} = z/b$ . Учитывая, что время включения и настройки резервного канала не может быть меньше времени передачи сообщения, то анализируемый диапазон изменения задержки  $z_{\Pi}$  выбран от 1 до уровня задержки, при которой дополнительный канал необходимо подключать сразу при появлении первого сообщения в буфере ( $L=2$ ).

В последней строке таблицы приведены значения относительных издержек ( $\mathcal{E}_1$ ) для одноканальной системы с аналогичным буфером без резервирования для тех же вариантов входного ММР-потока. При этом значение  $\mathcal{E}_1$  показывает, какую долю пропускной способности канала надо дополнительно арендовать на постоянной основе, чтобы «справляться» с неожиданными перегрузками канала трафиком, интенсивность которого в период пульсации в 2-3 раза превышает среднюю (прогнозируемую) величину. Так для случая, когда коэффициент пульсации

$K_{\Pi}=3$ , необходим канал, фактически, с удвоенной скоростью передачи ( $\mathcal{E}_1=198\%$ ).

Анализ данных, приведенных в *таблице 1*, показывает, что для всех рассматриваемых случаев оперативный маневр резервными каналами дает положительный эффект от 40 до 15% по сравнению с постоянной арендой дополнительного радиоресурса для каждого направления связи. Однако по мере увеличения задержек включения резервных каналов эффект от маневра резервами заметно снижается. Так, при увеличении значений относительной задержки  $z_{\Pi}$  свыше 8, выигрыш составляет менее 20%. Кроме того, следует отметить, что снижение оперативности резервирования (увеличение задержки  $z_{\Pi}$ ) приводит к необходимости снижения порогового значения  $L$ , достижение которого является критерием возникновения угрозы перегрузки и определяет момент передачи запроса. При увеличении  $K_{\Pi}$  входящего ММР-потока от 3 и выше подключение всего лишь одного дополнительного канала дает заметный эффект только при мгновенной реакции на угрозу перегрузки, что и видно из третьего раздела таблицы (т.е. постоянно наготове должен быть дополнительный резервный канал). В четвертом столбце каждого раздела для трех значений  $K_{\Pi}$  приведены значения  $\mathcal{E}$ , которые соответствуют относительной эффективности оперативного подключения дополнительного канала, в том случае, когда его стоимость совпадает со стоимостью основного канала (а не на 50% выше, как при расчетах  $\mathcal{E}_2$ ). Эта же величина позволяет судить о том, какую долю времени система работает в двухканальном режиме (цифры, превышающие 100%), т.е. о степени задействования резервного канала. Кроме того, эта величина дополнительно характеризует возможность совместного использования резервных каналов на нескольких направлениях связи, например, в сетях спутниковой связи.

**Таблица 1**

Результаты моделирования одноканальной системы с входным ММР-потоком и буфером  $R=30$  (резервный канал включается при заполнении буфера выше уровня  $L$ )

$z_{\Pi}$	$K_{\Pi}=2;$ $\lambda_1=2; T_a=15; \lambda_2=0.5; T_s=30$				$K_{\Pi}=2.5;$ $\lambda_1=2.5; T_a=12; \lambda_2=0.5; T_s=36$				$K_{\Pi}=3;$ $\lambda_1=3; T_a=10; \lambda_2=0.5; T_s=40$			
	$L$	$q$	$\mathcal{E}_2(\%)$	$\mathcal{E}(\%)$	$L$	$q$	$\mathcal{E}_2(\%)$	$\mathcal{E}(\%)$	$L$	$q$	$\mathcal{E}_2(\%)$	$\mathcal{E}(\%)$
1	27	8.4	129	119	18	6.5	137	125	2	4.3	152	135
2	26	8.3	129	119	15	6.2	138	126				
3	25	8.2	129	119	13	6.0	139	126				
4	23	7.9	130	120	11	5.9	140	126				
6	21	7.8	103	120	7	5.6	141	127				
8	18	7.4	131	121	2	5.4	143	129				
10	15	7.1	132	122								
14	9	6.5	134	123								
18	2	6.3	136	124								
без доп. канала (рис.1)		5.8	$\mathcal{E}_1 = 152\%$			4.8	$\mathcal{E}_1 = 176\%$			4.2	$\mathcal{E}_1 = 198\%$	

### Заключение

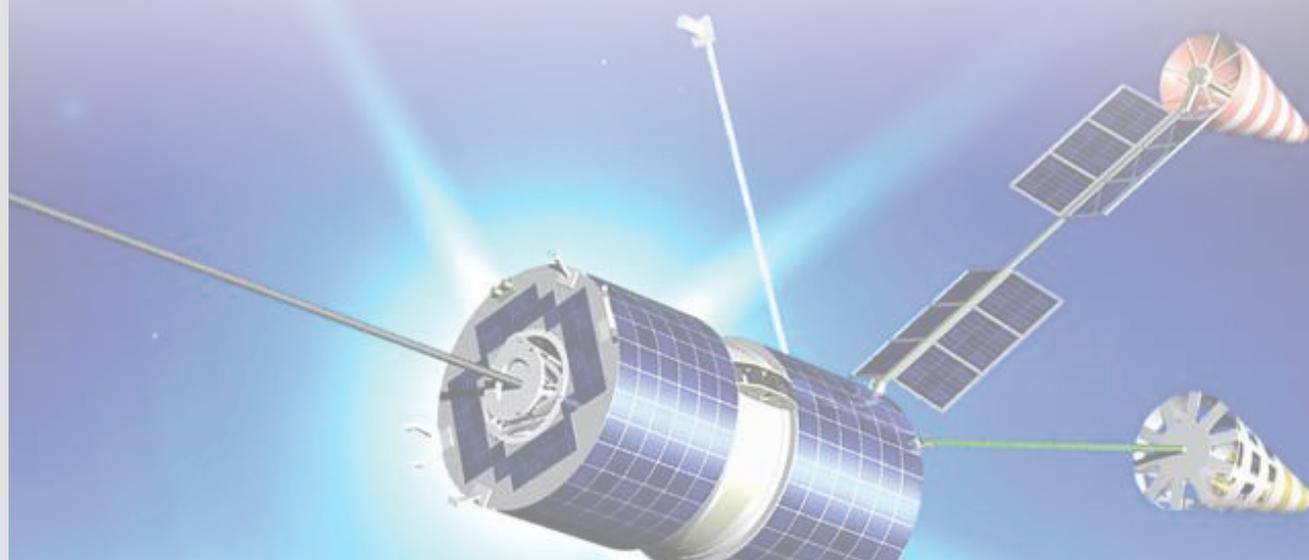
Оперативный маневр резервными каналами при значительных колебаниях информационной нагрузки в направлениях связи позволяет существенно повысить эффективность использования радиоресурсов СПИ, в особенности систем спутниковой связи, несмотря на высокие задержки распространения сигналов и, как следствие, запаздывание в управлении. Особенно заметным этот эффект ожидается при совместном использовании резервов на нескольких направлениях связи, например, на узловых станциях спутниковой связи.

Следует отметить, что используемый подход для ММР-потока с двумя состояниями, соответствующим интенсивностям входного потока  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , легко может быть распространен [4] и на большее количество состояний в зависимости от контекста инженерной задачи. В работе рассмотрен случай, который наиболее часто встречается на практике, когда неожиданные периоды повышенной нагрузки различной продолжительности чередуются с периодами относительного «затишья».

В заключение следует отметить, что применение в качестве модели входного потока марковски-модулированного пуассоновского процесса (ММРР) является лишь одним из средств [3,4,6,9], позволяющих учесть сложную структуру мультисервисного трафика или так называемый эффект «самоподобия», характерный для трафика современных телекоммуникационных сетей. Однако применение такого подхода и проработанность методического аппарата расчета многомерных марковских моделей позволяет не только ставить задачи управления в стохастических системах, но и довести решение до численного результата.

### Литература

1. Тарасов С.С. Современные технологии и системы спутникового доступа в сеть Интернет // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт, 2013. Т.7. №10. С. 89-91.
2. K. Zheng, F. Hu, W. Wang, W. Xiang and M. Dohler. Radio resource allocation in LTE-advanced cellular networks with M2M communications // IEEE Communications Magazine, 2012. Vol.50(7). Pp.184-192.
3. Fischer, W., Meier-Hellstern, K. The Markov-modulated Poisson process (MMPP) cookbook. Perf. Eval, 1993. №18(2). Pp.149-171.
4. Anderson A.T., Nielsen B. F. An Application of Superposition of Two State Markovian Source to the Modeling of Self-Similar Behavior, Proc. INFOCOM'97, Kobe, Japan, 1997. Pp.196-204.
5. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ./ Под ред. В.И.Неймана. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
6. Akimaru H., Kawashima K., Teletraffic Theory and Applications. Springer, 1993.
7. Рыжиков Ю.И., Хомоненко А.Д. Итерационный метод расчета многоканальных систем с произвольным законом обслуживания // Проблемы управления и теории информации, 1980. Т.9. №3. С.203-213.
8. Астахов Е.Н., Косяков Е.Н. Оперативное резервирование каналов как средство борьбы с перегрузками направлений связи // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2020. №673. С.42-47.
9. Ramesh N.I. Statistical analysis on Markov-modulated Poisson processes. Environmetrics 6(2), 1995. Pp.165-179.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.78

## ПОДХОД К УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

## AN APPROACH TO IMPROVING THE MATHEMATICAL MODEL OF THE ONBOARD SYSTEM OF A SPACECRAFT



**Владимир Леонидович Захаров**  
доктор военных наук, профессор  
действительный член АВН  
профессор кафедры  
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)  
Адрес: 125993, Москва,  
Волоколамское шоссе, д. 4  
Тел.: +7 (905) 566-17-94  
E-mail: varahas@yandex.ru

**Илья Анатольевич Трофимов**  
кандидат технических наук  
доцент кафедры  
ВКА имени А.Ф.Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (911) 163-12-99

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**  
почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, доцент  
действительный член АИИ  
профессор кафедры  
ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)  
Первый Вице-президент Института –  
заместитель Председателя Правления Института  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: dv\_smr@iifmail.ru

**Сергей Валерьевич Слатов**  
адъюнкт кафедры  
ВКА имени А.Ф.Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (911) 767-55-31

### Аннотация

В статье обоснована важность усовершенствования моделей бортовых систем космических аппаратов для повышения качества контроля технического состояния. Выработан подход к усовершенствованию на основе интеллектуальных технологий. Предложен вариант математической модели на основе конечного автомата и примерная последовательность действий по ее усовершенствованию.

**Ключевые слова:** математическая модель, бортовая система, контроль технического состояния.

### Summary

The article substantiates the importance of improving models of onboard systems of spacecraft to improve the quality of the technical condition control. An approach to improvement based on intelligent technologies has been developed. A variant of a mathematical mode based on a finite state machine and an approximate sequence of actions for its improvement are proposed.

**Keywords:** mathematical model, onboard system, technical condition control.

### Введение

Перечень функциональных возможностей современных и перспективных космических аппаратов (КА) обусловил рост их сложности, которая актуализировала задачу поддержания в работоспособном состоянии бортовых систем (БС) КА.

Среди вариантов сохранения показателей работоспособности БС КА следует отметить качественный контроль технического состояния (ТС) БС КА и своевременное выявление неисправности в условиях орбитального полета бортовыми средствами.

Одним из подходов решения указанной за-

дачи является применение интеллектуальных систем [1], которые могут оперативно получать информацию от объекта контроля, преобразовывать ее в форму удобную для формирования выводов и принятия решений. В структуру таких систем, как правило, помимо самого объекта контроля входит некоторая его модель, описываемая математическим образом.

Информация о контролируемых параметрах (КП) в интеллектуальные системы поступает посредством опроса соответствующих датчиков. Такая обработка данных основывается на специальных алгоритмах контроля, диагностирования и восстановления работоспособности.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Необходимость осуществления контроля в масштабе реального времени в условиях орбитальной эксплуатации накладывает на модель объекта требования адекватности и, одновременно, простоты, которым соответствуют модели агрегированного типа.

Анализ технического состояния БС КА в процессе орбитального полета позволит оценить работоспособность КА в целом в текущий момент времени, определить соответствие значений КП требованиям технической документации и своевременно принять решение о проведении восстановительных операций.

Таким образом, актуальной можно считать задачу по разработке и совершенствованию моделей, позволяющих адекватно оценить техническое состояние БС КА и направленных на повышение показателей надежности и эффективности функционирования КА в целом.

### Усовершенствование конечно-автоматной модели бортовой системы космического аппарата

Один из агрегированных типов моделей, у которых явным преимуществом является адекватное представление логико-временных особенностей процессов целевого функционирования БС КА, как сложных технических систем, а также их структуры представляют собой конечные автоматы и их различные вариации [2].

Конечные автоматы, как математические модели хорошо работают в терминах «условие» и «событие» при анализе структуры и динамики функционирования систем.

Классические конечные автоматы проявляют детерминированный характер правил функционирования и структурных взаимосвязей и являются четкими моделями. Это несколько ограничивает возможности их использования в науке и практике.

К недостаткам конечных автоматов при синтезе на их базе моделей БС КА следует отнести сложность привязки возможных неисправностей БС к конкретным режимам работы и низкая достоверность контроля ТС БС при работе с КП функционального типа.

Для парирования указанных недостатков предлагается усовершенствовать классический конечный автомат с помощью современных интеллектуальных подходов к контролю и анализу ТС сложных динамических систем. Указанные подходы позволят при выявлении нарушения в работе БС КА в каждом конкретном режиме работы оценить возможные неисправности и при необходимости с заданной достоверностью уточнить текущее ТС посредством тестового ди-

агностирования. В качестве современных подходов, которые можно использовать при доработке конечно-автоматных моделей для работы с неопределенностью в условиях орбитального полета КА можно назвать: нечеткую логику, нейронные сети, байесовский метод и их многочисленные вариации [3].

После усовершенствования область применения конечного автомата может значительно расширяться при решении прикладных задач диагностирования КА в период орбитальной эксплуатации.

Следует отметить, что контроль технического состояния БС может осуществляться в рабочем варианте (штатное функционирование КА), а при необходимости – в тестовом (в соответствии с тестовой программой).

Данная работа посвящена в основном усовершенствованию модели БС для контроля ТС при штатном функционировании КА на основе конечного автомата с учетом возможности последующей доработки в указанном выше направлении.

### Конечно-автоматная модель бортовой системы космического аппарата

Модель БС КА как объекта контроля на основе конечного автомата может быть представлена в следующем виде:

$$M(A): \{Q, Y, X, \varphi, f\}, \quad (1)$$

где  $A$  – некоторая БС КА, (например, система ориентации, бортовая информационно-телеметрическая система и др.);

$Q$  – состояния БС, соответствующие различным режимам функционирования, техническому состоянию и возможным неисправностям (например, включено, выключено, исправно, неисправен датчик и др.);

$X$  – команды управления БС с учетом времени их выполнения (например, гашение начальных угловых скоростей, расчет гироскопических моментов и др.);

$Y$  – множество КП, по значениям которых в текущий момент времени происходит оценка ТС (например, напряжение, освещенность, мощность и др.);

$f$  – функция переходов,  $f: Q \times X \rightarrow Q$ , которая однозначно определяет правило перехода БС из одного режима работы в другой по командам управления;

$\varphi$  – функция выходов,  $\varphi: Q \rightarrow Y$ , которая каждому режиму работы БС и ее техническому состоянию ставит в соответствие значения КП.

Представленная модель подразумевает следующий порядок осуществления контроля технического состояния БС. В определенный мо-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

мент функционирования КА его БС находится в одном из состояний из множества  $Q$ . Состояние БС определяется режимом работы, а также ТС (например, исправно или неисправно). Переключение в другой режим работы происходит по команде из множества  $X$  в соответствии с функцией переходов. Режим работы и ТС согласно функции выходов характеризуются значениями КП из множества  $Y$ . Наличие неисправности фиксируется при отклонении значений  $Y$  от установленных в эксплуатационно-технической документации (ЭТД). Данное событие диктует необходимость проведения операций по диагностированию и восстановлению работоспособности БС.

Для повышения адекватности модели БС при самостоятельном решении КА названных задач предполагается: множеству КП  $Y$  поставить в однозначное соответствие множество специальных переменных, которые помогут численно охарактеризовать показания КП на предмет соответствия допускам, указанным в ЭТД. Таким образом, повышение достоверности при решении задачи контроля ТС может быть достигнуто на основе применения интеллектуальных алгоритмов, (например, алгоритма нечеткого логического вывода). Данные алгоритмы реализуют отображение обратной функции выходов  $\varphi: \varphi^{-1} = Y \rightarrow Q$ , позволяющее в любой момент времени по набору значений КП непосредственно определить предполагаемую неисправность и принять достоверное решение о ТС или необходимости тестового контроля.

Указанные выше специальные переменные на этапе построения модели БС участвуют в формировании основы для интеллектуальной системы принятия решения (базы нечеткого вывода) в качестве входов. Выходами такой системы бу-

дут переменные соответствующие конкретным неисправностям БС и позволяющие их оценить численно. При построении системы необходимо использовать знания экспертов и статистические данные о возможных неисправностях БС.

Если к усовершенствованию математической модели бортовой системы космического аппарата подходить на основе аппарата теории нечетких множеств, то в общем случае можно использовать следующую последовательность действий:

1. Анализ влияния команд управления  $X$  на КП  $Y$  и разделение КП  $Y$  на соответствующие типы.
2. Выявление особенностей функционирования БС и взаимовлияния КП  $Y$ .
3. Получение множества подавтоматов БС и уточнение их иерархии взаимовлияния.
4. Построение моделей, описывающих работу каждого подавтомата с учетом соответствующих неисправностей.
5. Построение единого конечного автомата, описывающего функционирование БС (например, в виде таблицы состояний и выходов).
6. Усовершенствование построенной модели путем построения базы нечетких правил на основе обратной функции выходов конечного автомата.
7. Уточнение базы нечетких правил посредством настройки (обучения) и оптимизации.

Усовершенствованная математическая модель БС КА для контроля ТС может быть представлена в виде таблицы состояний и выходов (таблица 1).

Усовершенствованная модель БС КА сможет учитывать численные оценки возможных неисправностей. Это особенно важно для выявления отдельных неисправностей, которые по-разному

**Таблица 1**  
Фрагмент таблицы состояний и выходов модели СО КА

Состояния бортовой системы космического аппарата				Контролируемые параметры		
Режимы функционирования бортовой системы (состояния подавтоматов)	Технические диагнозы					
	БС исправна	неисправен блок № 1	неисправен блок № 2	БС включена	Включен блок	Рабочая мощность
$Q_1$ : БС выключена, подключен блок №1, передача сигнала остановлена	верно	не верно	*	0	блок № 1	нет сигнала
	не верно	верно	*	0	блок № 1	не норма
	не верно	верно	*	0	блок № 1	сигнал
$Q_2$ : БС включен, подключен блок №2, передача сигнала	верно	*	не верно	1	блок № 2	сигнал
	не верно	*	верно	1	блок № 2	не норма
	не верно	*	верно	1	блок № 2	нет сигнала

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

проявляют себя в различных режимах функционирования и, в целом, позволит повысить достоверность контроля ТС БС во время орбитального полета.

### Заключение

1. С учетом современных тенденций к росту сложности решаемых КА задач обоснована важность процесса усовершенствования моделей БС КА для повышения качества контроля ТС в процессе орбитального полета.

2. Выработан подход к усовершенствованию математической модели БС КА на основе интеллектуальных технологий, позволяющий численно оценить возможные технические диагнозы.

3. Предложен вариант модели БС КА на основе конечного автомата, а также примерная

последовательность действий по ее усовершенствованию, которая учитывает специфику контроля ТС в разных режимах работы БС КА.

### Литература

1. Адаменко А. Н. Системы искусственного интеллекта: учебное пособие / А.Н. Адаменко, С.В. Войцеховский, Р.И. Компаниец и др. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 291 с.
2. Козырев Г. И., Лоскутов А. И. Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем: учебное пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 158 с.
3. Хаматов А.А., Лоскутов А.И., Евенко А.В. Модель процесса диагностирования специального бортового комплекса космического аппарата-ретранслятора // ОКНТПР, 2017. № 1. С.27-31.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ ЗАЩИТЫ ОДНОТИПНЫХ ОБЪЕКТОВ АСУ ТП

## OPTIMIZATION OF THE UTILIZATION OF VARIOUS PROTECTION OPTIONS FOR THE SIMILAR OBJECTS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS



**Борис Федорович Безродный**

доктор технических наук, профессор

заместитель руководителя

Центр кибербезопасности АО «НИИАС»

Адрес: 109029, Москва Нижегородская ул., д. 27, стр. 1

заведующий кафедрой «Прикладная математика»

Московский автомобильно-дорожный

государственный технический университет (МАДИ)

Адрес: 125319, Москва, Ленинградский просп., д. 64

Тел. +7 (985)774-28-26

E-mail: boris-bezrodny@yandex.ru

**Лариса Владимировна Любимова**

ведущий инженер

Центр кибербезопасности АО «НИИАС»

Адрес: 109029, Москва Нижегородская ул., д. 27, стр. 1

Тел. +7 (916) 128-23-98

E-mail: lv.lyubimova@gmail.com

### Аннотация

На практике для обеспечения успешного отражения кибератак следует учитывать не только различные действия злоумышленника, но и возникающие материальные ограничения. В статье на основе вероятностно-игрового подхода предложена методика, с помощью которой возможно отыскать оптимальные вероятности применения стратегий защиты с учетом этих двух факторов. Предложенная методика применима, когда требуется защитить не один отдельный объект, а группу однотипных объектов АСУ ТП.

**Ключевые слова:** кибербезопасность, железнодорожный транспорт, отражение кибератаки, вероятность, автоматизированная система управления технологическим процессом.

### Summary

In practice, to ensure the successful repelling of cyber attacks, it is necessary to take into account not only the various actions of the attacker, but also the material limitations that arise. In the article, based on the probabilistic-gaming approach, a technique is proposed by which it is possible to find the optimal probabilities of using protection strategies taking into account these two factors. The proposed technique is applicable when it is required to protect not one individual object, but a group of similar automated control system objects.

**Keywords:** cybersecurity, railway transport, reflection of cyberattacks, probability, automated process control system.

Применение АСУ ТП на железнодорожном транспорте с одной стороны позволяет повысить безопасность движения и обеспечить безотказность систем, а с другой приводит к потенциальной возможности деструктивного информационного воздействия на системы (проведение кибератак). Учитывая, что угрозы возникают быстрее, чем стратегии защиты, появляется потребность в применении новых подходов к обеспечению кибербезопасности. Актуальной становится возможность оперативно корректировать не только набор стратегий защиты, используемых при отражении кибератак, но и очередность использования этих стратегий.

В статье предлагается методика определения оптимального порядка применения различных используемых стратегий для защиты АСУ ТП от кибератак.

Ранее авторами уже было описано, как рассчитать вероятность успешного отражения кибератаки с учетом выбранных стратегий защиты [1]. Для этого используется формула полной вероятности:

$$P(A) = \sum_{j=1}^k r_j q_j \quad (1)$$

где  $r_j = P(A|B_j)$  – условная вероятность успешного отражения кибератаки при условии выбора для его обеспечения  $j$ -й стратегии защиты;

$q_j = P(B_j)$  – безусловная вероятность выбора из возможных вариантов  $j$ -й стратегии защиты для отражения кибератаки (т.е. частота, с которой она выбирается).

Защита от кибератаки представляет собой набор организационных и технических мер, и имеет определённую стоимость. Среднее значение которой, в пересчете на один защищаемый объект АСУ ТП, рассчитывается по формуле:

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$C = \sum_{j=1}^k c_j q_j \quad (2)$$

где  $c_j$  - стоимость технического обеспечения  $j$ -ой стратегии защиты.

При проведении кибератаки злоумышленник может действовать по разным сценариям  $G_t$ . Учитывая это, условная вероятность успешного отражения кибератаки вычисляется по формуле:

$$r_j = \sum_{t=1}^m d_{jt} w_t \quad (3)$$

а формула (1) принимает вид:

$$P(A) = \sum_{j=1}^k \sum_{t=1}^m d_{jt} w_t q_j \quad (4)$$

где  $d_{jt} = P(A|B_j|G_t)$  - условные вероятности успешного отражения кибератаки при условии применения  $j$ -й стратегии защиты и действия злоумышленника по  $t$ -му сценарию;

$w_t = P(G_t)$  - безусловная вероятность, которая определяет возможность злоумышленника действовать по  $t$ -му сценарию.

На практике стоимость мер, применяемых при отражении кибератак, ограничена величиной  $C_0$ . С учетом этого задача оптимизации порядка использования (применения) стратегий защиты имеет вид:

$$P \rightarrow \max, \text{ при } C \leq C_0 \quad (5)$$

В итоге с учетом накладываемых на безусловную вероятность  $q_j$  ограничений

$$0 \leq q_j \leq 1; \sum_{j=1}^k q_j = 1 \quad (6)$$

оптимизационная задача (5) принимает вид:

$$P_{\max} = \max_{\{q_j\}} \sum_{j=1}^k r_j q_j \quad (7)$$

Отметим, что эта постановка задачи описывает ситуацию, когда для определения вероятностей  $w_t$  использования злоумышленником различных сценариев кибератак применяется ранее накопленная статистика его действий или считается, что он не осведомлен о применяемых мерах защиты АСУ ТП. Решить задачу (7), которая является классической задачей линейного программирования, можно симплекс методом [2].

Если же злоумышленник полностью осведомлен о применяемых мерах защиты, т.е. использует свои сценарии кибератак неслучайным образом, складывается более трудная для решения матричная игра. В таком случае с учетом ограничений, накладываемых на безусловную вероятность  $w_t$

$$0 \leq w_t \leq 1; \sum_{t=1}^m w_t = 1 \quad (8)$$

оптимизационная задача (5) принимает вид:

$$P_{\max} = \max_{\{q_j\}} \min_{\{w_t\}} \sum_{j=1}^k \sum_{t=1}^m d_{jt} q_j w_t \quad (9)$$

при

$$\sum_{j=1}^k q_j = 1; \sum_{t=1}^m w_t = 1; \sum_{j=1}^k c_j q_j \leq C_0$$

Ранее авторами уже было описано решение

оптимизационных задач (7) и (9) в чистых стратегиях. В статье [3] предложена методика определения сценария кибератаки, наиболее выгодного для злоумышленника, и стратегии защиты, наиболее выгодной для обеспечения кибербезопасности отдельного объекта АСУ ТП.

Однако, когда требуется защитить не один отдельный объект, а группу однотипных объектов АСУ ТП, вероятность успешного отражения кибератаки в пересчете на один такой объект можно существенно улучшить, используя все имеющиеся стратегии в некоторых пропорциях, то есть с некоторыми частотами (вероятностями), допуская, что злоумышленник будет также варьировать выбор сценариев своих действий. Такой подход приводит к задаче (9) решения матричной игры в смешанных стратегиях.

Однако, воспользоваться для этих целей известным методом, заключающимся в решении двух двойственных задач линейного программирования [4], не позволяющее введенное нами стоимостное ограничение

$$\sum_{j=1}^k c_j q_j \leq C_0 \quad (10)$$

Для преодоления этой трудности предлагается модернизировать вышеупомянутый известный метод решения матричной игры в смешанных стратегиях с учетом этого ограничения на стоимость технического обеспечения киберзащиты (в пересчете на один типовой объект АСУ ТП) следующим образом.

Известно, что при решении в смешанных стратегиях любая матричная игра имеет седловую точку и решение  $\vec{q}^*$ ,  $\vec{w}^*$  с ценой игры  $v$ . С учетом этого возможно привести решение матричной игры к задаче линейного программирования.

Применение различных стратегий киберзащиты объектов АСУ ТП из защищаемой группы с частотами, определяемыми оптимальной смешанной стратегией  $\vec{q}^* = (q_1, \dots, q_k)$  гарантирует нам, что вероятность отражения кибератаки будет не меньше  $v$ , независимо от сценария атаки  $G_t$ , выбираемого злоумышленником. Это можно записать в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} d_{11}q_1 + d_{21}q_2 + \dots + d_{k1}q_k \geq v \\ d_{12}q_1 + d_{22}q_2 + \dots + d_{k2}q_k \geq v \\ \dots \\ d_{1m}q_1 + d_{2m}q_2 + \dots + d_{km}q_k \geq v \end{cases} \quad (11)$$

где  $q_1 + q_2 + \dots + q_k = 1; q_j \geq 0$ .

В системе неравенств (11)  $d_{11}q_1 + d_{21}q_2 + \dots + d_{k1}q_k$  - математическое ожидание вероятности успешного отражения кибератаки, если злоумышленник действует по  $t$ -му сценарию атаки, а защита применяет оптимальную смешанную стратегию,

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

то есть различные стратегии защиты в пропорциях  $\bar{q}^*$ .

Аналогично смешанная стратегия  $\bar{w}^*$  гарантирует злоумышленнику, что вероятность успешного отражения его кибератаки не превысит  $\nu$ , независимо от выбора стратегии защиты

$$\begin{cases} d_{11}w_1 + d_{12}w_2 + \dots + d_{1m}w_m \leq \nu \\ d_{21}w_1 + d_{22}w_2 + \dots + d_{2m}w_m \leq \nu \\ \dots \\ d_{k1}w_1 + d_{k2}w_2 + \dots + d_{km}w_m \leq \nu \end{cases} \quad (12)$$

где  $w_1 + w_2 + \dots + w_m = 1$ ;  $w_i \geq 0$ .

В системе неравенств (12)  $d_{j1}w_1 + d_{j2}w_2 + \dots + d_{jm}w_m$  – математическое ожидание вероятности успешного отражения кибератаки с условием, что защита применяет  $j$ -ую стратегию, а злоумышленник действует по оптимальной смешанной стратегии использования различных сценариев кибератаки в оптимальных определяемых ею пропорциях.

После введения замены переменных  $x_j = q_j/\nu$  и  $y_i = w_i/\nu$  неравенства (11) и (12) принимают вид:

$$\begin{cases} d_{11}x_1 + d_{12}x_2 + \dots + d_{1k}x_k \geq 1 \\ d_{21}x_1 + d_{22}x_2 + \dots + d_{2k}x_k \geq 1 \\ \dots \\ d_{l1}x_1 + d_{l2}x_2 + \dots + d_{lk}x_k \geq 1 \end{cases} \quad (13)$$

где  
при 
$$x_j \geq 0; j = \overline{1; k} \quad (14)$$

и 
$$\begin{cases} d_{11}y_1 + d_{12}y_2 + \dots + d_{1m}y_m \leq 1 \\ d_{21}y_1 + d_{22}y_2 + \dots + d_{2m}y_m \leq 1 \\ \dots \\ d_{k1}y_1 + d_{k2}y_2 + \dots + d_{km}y_m \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

где  
при 
$$y_i \geq 0; i = \overline{1; m} \quad (16)$$

Задачи (13), (14) и (15), (16) образуют пару двойственных задач линейного программирования, каждая из которых при отсутствии стоимостного ограничения решалась бы самостоятельно, давая в результате цену игры и соответствующие оптимальные вероятности использования различных сценариев кибератаки злоумышленником и применения различных стратегий обеспечения кибербезопасности. Мы же предлагаем решить лишь одну из этих двойственных задач линейного программирования:

$$\begin{aligned} & y_1 + y_2 + \dots + y_m \rightarrow \max \\ & \begin{cases} d_{11}y_1 + d_{12}y_2 + \dots + d_{1m}y_m \leq 1 \\ d_{21}y_1 + d_{22}y_2 + \dots + d_{2m}y_m \leq 1 \\ \dots \\ d_{k1}y_1 + d_{k2}y_2 + \dots + d_{km}y_m \leq 1 \end{cases} \quad (17) \\ & y_i \geq 0; i = \overline{1; m} \end{aligned}$$

в результате решения которой, мы находим гарантированно (независимо от действий злоумышленника) достижимое значение  $\nu$  вероятности успешного отражения кибератаки в пересчете на один объект из группы защищаемых объектов АСУ ТП и оптимальные с точки зрения злоумышленника вероятности (частоты)  $\bar{w}^*$  использования им различных сценариев проводимых кибератак. Далее полученные оптимальные значения этих вероятностей следует, считая их уже известными нам, подставить в выражения (3). После этого с учетом неизвестного злоумышленнику стоимостного ограничения (10) решить задачу линейного программирования (7) с целью определения оптимальных значений вероятностей (частот)  $\bar{q}^*$ , с которыми следует применять различные стратегии защиты при обеспечении кибербезопасности группы однотипных объектов АСУ ТП с целью достижения максимально возможной в рамках имеющегося стоимостного ограничения вероятности успешного отражения кибератаки в пересчете на один защищаемый объект.

Предложенная методика позволяет при организации киберзащиты группы однотипных объектов АСУ ТП с учетом возникающих на практике материальных ограничений найти оптимальные вероятности использования различных стратегий защиты при любых вариантах действий злоумышленника.

### Литература

1. Безродный Б.Ф., Любимова Л.В. Вероятностно-игровой подход к оценке эффективности киберзащитенности АСУ ТП // Транспортная безопасность и технологии, 2019. №1(56). С.70-71.
2. Школьников А.Д. Основы теории игр. Ленинград, 1970. 52 с.
3. Безродный Б.Ф., Любимова Л.В. Процедура выбора оптимальной стратегии защиты АСУ ТП от кибератак // Железнодорожный транспорт, 2020. № 3. С. 42-44.
4. Е.С. Вентцель. Исследование операций. Задачи. Принципы. Методология. М.: Наука, 1988. 208 с.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056.53

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ОПЕРАТОРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ С МАНИПУЛЯТОРОМ ТИПА «МЫШЬ»

## PARAMETRIC MODEL OF THE WORK OF THE OPERATOR OF AN AUTOMATED SYSTEM WITH A MANIPULATOR OF THE «MOUSE» TYPE

**Вадим Геннадьевич Грибунин**

доктор технических наук  
главный научный сотрудник  
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

**Андрей Петрович Лабазников**  
военнослужащий

### Аннотация

В статье представлена параметрическая модель работы оператора информационной системы с мышью, позволяющая идентифицировать законного пользователя по почерку его работы. Рассмотрена таксономия признаков, подробно описаны первичные и вторичные признаки. Предложены новые признаки. Также описаны общедоступные наборы данных по работе оператора с мышью.

**Ключевые слова:** идентификация оператора, параметрическая модель, манипулятор типа "мышь", признаковое пространство, статистика.

### Summary

The article presents a parametric model of the mouse dynamic of an information system operator, which allows identifying a legitimate user. The taxonomy of mouse dynamic features is considered, primary and secondary features are described in detail. New features are proposed. Public datasets on the operator's work with the mouse are also described.

**Keywords:** operator identification, parametric model, mouse-type manipulator, attribute space, statistics.

### Цель изучения работы с манипуляторами

Вопросы защиты информации в автоматизированных системах (АС) имеют первостепенное значение. Главное условие обеспечения безопасности информации – управление доступом субъектов к защищаемым активам [1]. Для этого субъекты должны быть надежно идентифицированы и аутентифицированы. В АС данная процедура обычно выполняется в начале работы оператора (в начале сессии). При этом оператор вводит пароль, предъявляет токен или же использует биометрическое средство аутентификации.

Однако существует угроза имперсонализации оператора в процессе работы АС [2]. Сессия законного пользователя может быть перехвачена нарушителем, перенаправлена им на себя. Либо оператор может на время отойти от рабочего места, не выходя из текущей сессии, и нарушитель займет его место. Наконец, недобросовестный оператор может передать свои аутентификационные данные другому лицу (средства биометрической аутентификации дороги и редко используются).

Для исключения подобных ситуаций необходима реализация (квази)непрерывной аутентификации оператора в процессе его работы. Одним из возможных решений является использование для аутентификации почерка работы пользователя в человеко-машинном интерфейсе – особенности набора на клавиатуре, обращения с манипуляторами – трекболом, сенсорным экраном, мышью [3]. Такую аутентификацию назовем косвенной биометрической аутентификацией. В отличие от обычной биометрической аутентификации она не требует дополнительного оборудования. Именно исследованию почерка оператора при работе с манипулятором типа «мышь» и посвящена настоящая работа. Далее этот манипулятор будем называть просто мышью.

В системном анализе под параметром понимается признак (свойство), который характеризует явление или предмет реальной действительности. Выделение таких параметров и их оценка называется параметризацией. Параметризации почерка оператора при работе с мышью и посвящена данная работа.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Первичные признаки при работе с мышью

Выполняемые оператором действия с мышью (нажатие клавиш, перемещение курсора) будем называть первичными признаками. Для классификации обычно бывает выгодно использовать некоторые производные (вычисляемые) от первичных признаков значения, которые мы будем называть вторичными признаками.

Для определения первичных признаков определимся с типом мыши. Компьютерные мыши бывают одно-, двух- и трехкнопочными. Далее будем рассматривать только двухкнопочные мыши, как наиболее часто используемые в ответственных АС. Информацию, поступающую от колесика мыши, далее учитывать не будем, так как она отсутствует в доступных наборах данных [4-6], хотя, по нашему мнению, тоже является важной.

Первичные признаки разделим на низкоуровневые и высокоуровневые [7]. К низкоуровневым отнесем непосредственно регистрируемые программным обеспечением поступающие с мыши сигналы. К высокоуровневым отнесем результат агрегации низкоуровневых признаков.

С каждым из низкоуровневых признаков связано время регистрации события, которое представлено в виде дискретного набора значений  $\{t_i\}$ ,  $i \in Z^+$ .

В каждый момент времени  $t_i$  регистрируются следующие значения:

- координата  $x$  курсора на экране монитора;
- координата  $y$  курсора на экране монитора;
- нажатие левой кнопки мыши –  $lp$ ;
- нажатие правой кнопки мыши –  $rp$ ;
- отжатие левой кнопки мыши –  $lr$ ;
- отжатие правой кнопки мыши –  $rr$ ;
- состояние курсора мыши (движение –  $mm$ /покой).

Из этих низкоуровневых признаков сформируем высокоуровневые, которые подразделим на 2 класса:

- признаки движения мыши;
- признаки нажатия клавиш мыши.

Движение мыши содержит в себе временную и пространственную информацию. Перед вычислением вторичных признаков необходимо агрегировать первичные признаки, то есть найти ту временную или пространственную совокупность событий, от которой будут вычисляться вторичные признаки. Обычно агрегирование выполняется во временной области. При этом известны два подхода: равномерное агрегирование, когда анализ выполняется в равномерно расположенных временных окнах (вне зависимости от контекста того, какие события в них происходят) [8] и неравномерное агрегирование по функциональному признаку (выполнение оператором некоторых действий). Последний подход представляется предпочтительным и будет рассматриваться далее.

Агрегирование признаков нажатия клавиш мыши можно производить в рамках сессии или даже нескольких сессий оператора.

Будем называть агрегированный набор данных перемещения мыши действием.

Таким образом, структура параметров модели работы оператора с мышью может быть представлена так, как на *рисунке 1*.

Действия движения мыши можно подразделить на простое перемещение курсора ( $MM$ ) и его перемещение с зажатой левой клавишей («drag-and-drop» –  $DD$ ).

Действие перемещения  $MM$  есть совокупность перемещений  $mm_i$ , таких, что соседние перемещения во времени отличаются не менее,



Рис. 1. Структура параметров модели работы оператора с мышью

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

чем на какую-то величину:

$MM_{t_1}^{t_k} = \langle mm_{t_1}, mm_{t_2}, \dots, mm_{t_k} \mid t_{n+1} - t_n \leq \eta_{MM} \rangle$ ,  
где  $\forall n: 1 \leq n \leq k$  и  $\eta_{MM}$  – порог для фиксации отсутствия движения. Таким образом, в действии допускается определенное количество состояний покоя между двумя состояниями движения.

Аналогично и

$DD_{t_1}^{t_k} = \langle dd_{t_1}, dd_{t_2}, \dots, dd_{t_k} \mid d_{n+1} - d_n \leq \eta_{DD} \rangle$ ,  
где  $\forall n: 1 \leq n \leq k$  и  $\eta_{DD}$  – порог для фиксации отсутствия перемещения. Перемещение  $dd$  определяется по факту нажатия клавиши ( $lp$ ) до ее отжатия ( $lr$ ).

Разделим действия перемещения  $MM$  на два подкласса:

1) Действие перемещения без последующего нажатия кнопки мыши (назовем его «бесцельным блужданием») –  $MM1$ ;

2) Действие перемещения, заканчивающееся нажатием кнопки мыши (назовем его «движением к цели») –  $MM2$ .

Нажатие кнопки может быть спустя некоторое время после окончания перемещения. Зададим порог  $\Delta t_{MM1} \leq \eta_{MM1}$ , чтобы учесть данный факт. Распределение времени  $\Delta t_{MM1}$  также является одним из возможных признаков.

Агрегирование и обработка признаков  $MM1$ ,  $MM2$  и  $DD$  производится одинаково, но отдельно друг от друга.

Кривая линия (кусочно-ломаная), возникающая при перемещении оператором мыши (далее – кривая), может быть описана упорядоченным набором двух или более точек:

$$C = (p_1, p_2, \dots, p_n), \text{ где } n \geq 2 - \text{число точек,}$$

$$p_i = (x_p, y_p) \in R^2.$$

Признаками кривой являются функции от ее координат:

$$F(C) = R^{2n} \rightarrow S \subset R,$$

где  $F(C)$  – семейство рассматриваемых далее функций.

Так как признак должен характеризовать оператора, то он должен быть независимым от решаемой задачи, от используемого оборудования, а также (в идеале) обладать свойствами инвариантности к повороту, масштабированию, сдвигу.

Помимо кривой линии (на основе которой находятся вторичные пространственные признаки) артефактом перемещения мыши являются временные параметры действия перемещения: скорость, ускорение и т.п., как рассмотрено далее.

Признаки нажатия клавиш мыши делятся на:

- щелчок левой кнопкой мыши ( $LC$ );
- щелчок правой кнопкой мыши ( $RC$ );
- двойной щелчок левой кнопкой мыши ( $DC$ ).

Выражение для их определения следующие:

$$LC_{t_1}^{t_2} = \langle lp_{t_1}, lr_{t_2} \mid t_2 - t_1 \leq \eta_{LC} \rangle$$

$$RC_{t_1}^{t_2} = \langle rp_{t_1}, rr_{t_2} \mid t_2 - t_1 \leq \eta_{RC} \rangle$$

Двойной щелчок описывается 4 моментами времени, при следующем условии:

$$DC_{t_1}^{t_4} = \langle LC_{t_1}^{t_2}, LC_{t_3}^{t_4} \mid t_3 - t_2 \leq \eta_{DC} \rangle,$$

где  $\eta_{DC}$  – порог для фиксации двойного щелчка.

### Известные наборы данных по работе оператора с мышью

Использование общедоступных наборов данных (датасетов), с одной стороны, упрощает за-

**Таблица 1**

Общедоступные датасеты по работе с мышью

Название	Пользователи	Содержание	Особенности
Balabit	10 (20)	Время, Клавиша, Состояние, x, y	Текстовые файлы
DFL	21	Время, Клавиша, Состояние, x, y	Текстовые файлы
Shen	28	x, y, Код, Время	Бинарные файлы

**Коды датасета Shen**

Код	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521
Действие	MouseMove	LB_Down	LB_Up	LB_DblClick	RB_Down	RB_Up	RB_DblClick	MB_Down	MB_Up	MB_DblClick

**Таблица 2**

Некоторые статистики датасета Balabit [9]

**Распределение действий по типам**

Наборы данных	ММ	РС	ДД
Обучение	12828 (21.06%)	41610 (68.32%)	6467 (10.62%)
Тестирование	8597 (20.90%)	28677 (69.7%)	3867 (9.4%)

**Распределение числа действий по сессиям**

Наборы данных	Мин	Среднее значение	Макс
Обучение	237	937	2488
Тестирование	4	50	175

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

дачу исследователя (так как требуется многочасовая работа нескольких операторов), с другой стороны, делает его результаты сравнимыми с результатами других исследователей.

Авторам удалось найти три общедоступных датасета [4-6] по работе операторов с мышью, представленные в *таблице 1*.

Как видно из *таблицы 1*, все датасеты содержат примерно одинаковую информацию («сырые данные»).

Распределение действий по типам для датасета Valabit приведено в *таблице 2* [9].

### Известные вторичные признаки при работе с мышью

Вторичные признаки вычисляются от признаков движения мыши, а также от событий двойного щелчка. От признаков одиночных щелчков вторичные признаки не вычисляются, так как эти события происходят достаточно редко и, можно сказать, некоррелированы друг с другом.

В *таблице 3* приведены признаки для двойного щелчка мышью.

В работе [10] предложены следующие базовые вторичные признаки для аутентификации оператора по движению мыши, которые сведены в *таблицу 4*. Эти же признаки использовались с небольшими вариациями и во многих других работах [7, 11, 12].

Здесь  $dx_k = x_{k+1} - x_k$ ,  $dy_k = y_{k+1} - y_k$ .

Далее в рассматриваемой работе для каждого из 11 векторов  $x, y, \theta, c, \Delta c, v_x, v_y, v, a, r, w$  вычислялись 5 статистик: минимальное, среднее и максимальное значение, стандартное отклонение и (максимум – минимум), что дало в результате 55

**Таблица 3**  
Признаки DC [10]

Наименование признака	Определение
Время первого щелчка	$t_2 - t_1$
Время второго щелчка	$t_4 - t_3$
Время первого интервала	$t_3 - t_1$
Время второго интервала	$t_4 - t_1$
Время третьего интервала	$t_3 - t_2$
Время четвертого интервала	$t_4 - t_2$

**Таблица 5**  
Набор признаков [7]

Наименование вычисляемого признака	Аргумент функции	Число признаков
Минимум, максимум, среднее значение, дисперсия, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса	$\theta, c, \Delta c, v_x, v_y, v, a, r, w$	54
Средняя частота, средняя мощность, пик мощности, пик частот	$c, \Delta c, v_x, v_y, v, a, r, w$	48
Длительность действия, Длина траектории	$t_n, s_n$	2
Прямизна траектории	$str$	1

признаков. К ним добавлялись признаки длительности действия  $t_n$  и длины траектории  $s_{n-1}$ . Далее учитывались такие признаки как прямизна траектории

$$str = \frac{\sqrt{(x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2}}{s_{n-1}},$$

джиттер (характеризует дрожание мыши в руках оператора), который рассчитывается как отношение длины сглаженной (B-сплайнами) траектории к длине исходной траектории  $\dot{j}it = s'_{n-1} / s_{n-1}$ .

Следующий признак – число критических точек

$$n_z = \sum_{i=1}^n z_i,$$

под которыми понимаются точки крутого поворота траектории, которые находились как

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta c_i = 0 \wedge |c_i| > \alpha, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Константа  $\alpha = n/10$  (рад/пикс<sup>2</sup>).

Следующими параметрами являются число пауз в действии, общее время пауз и доля вре-

**Таблица 4**

Базовые вторичные признаки движения мыши [10]

Пространственная информация (находится из сглаженных первичных признаков)	
Траектория	$s_i = \sum_{k=1}^{i-1} \sqrt{dx_k^2 + dy_k^2}$
Угол перемещения	$\theta_i = \arctan\left(\frac{dy_1}{dx_1} + \sum_{j=1}^i d\theta_j\right)$ $d\theta_i = \min\{d \arctan(dy_i / dx_i) + 2k'\pi\}$
Кривизна траектории	$c = d\theta / ds$
Изменение кривизны	$\Delta c = dc / dt$
Временная информация	
Горизонтальная скорость	$v_x = dx / dt$
Вертикальная скорость	$v_y = dy / dt$
Скорость (тангенциальная)	$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$
Ускорение	$a = dv / dt$
Рывок	$r = da / dt$
Угловая скорость	$w = d\theta / dt$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

мени пауз. Под паузой понимается отсутствие действия в течение более чем  $\beta=0,1$  сек. Тогда

$$n_p = \sum_{i=1}^n p_i, \text{ где } p_i = \begin{cases} 1, & \text{если } t_i > \beta \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases},$$
$$t_p = \sum_{i=1}^n p_i t_i, \quad t_{pr} = t_p / t_n.$$

Далее в работе [10] изучалась важность тех или иных признаков. Подробные результаты не приводятся, за исключением того, что наиболее показательными стали 5 признаков:  $\max(v_x)$ ,  $\min(v_x)$ ,  $\max(v_x) - \min(v_x)$ ,  $t_p$ ,  $j_{it}$ .

В работе [7], помимо пространственных и временных признаков, были использованы и спектральные признаки. В работе отмечено, что в силу того, что исходный набор данных дискретизирован неравномерно, напрямую преобразование Фурье применить нельзя. Поэтому используется известный метод вычисления периодограммы Ломба-Скаргла. В результате в работе используется набор признаков, представленный в таблице 5.

Можно предложить и другой метод расчета прямизны траектории, вычисляя ее на основе оценки корреляции между точками кривой. Вначале вычисляется ковариационная матрица координат точек:

$$KM = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{pmatrix},$$

где  $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$  – дисперсии вдоль соответствующих осей;

$\sigma_{xy}$  – ковариация  $x$  и  $y$ .

Затем находятся собственные значения этой матрицы. Наибольшее из них ( $\lambda_1$ ) будет представлять дисперсию в некотором направлении, а второе по величине ( $\lambda_2$ ) – дисперсию в ортогональном первому направлении. Тогда мерой прямизны может послужить величина

$$str = (\lambda_1 - \lambda_2) / \lambda_1 \in [0,1].$$

### Дополнительно предлагаемые вторичные признаки

Для действия типа «бесцельное блуждание» ММ1 может быть полезным параметр регулярности кривой. Признак регулярности кривой будем оценивать по тому, как расположены ее точки вокруг геометрического центра.

Геометрический центр кривой:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

Расстояния точек до центра:

$$d_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}$$

Регулярность определим так:

$$R = \mu_d / (\mu_d + \sigma_d),$$

где  $\mu_d$  и  $\sigma_d$  – математическое ожидание и дисперсия расстояний, соответственно.

Для действия «движения к цели» ММ2 предлагаются следующие дополнительные параме-

тры, от которых считаются соответствующие статистики:

- ускорение на начальном участке траектории (например, 5% пути)  $a_{ini}$ ;
- время до щелчка после остановки мыши  $\Delta t_{MM1} \leq \eta_{MM1}$ ;
- время между щелчками мыши при работе в предполагаемом интерфейсе;
- прямизна на участке траектории при подходе мыши к правому верхнему углу экрана, а также к элементам внизу экрана.

Два последних параметра требуют пояснения. Известны подходы, когда параметры движения мыши находились, в зависимости от используемых приложений [14]. Если точно известно местоположение элементов интерфейса, то можно использовать выражения, приведенные в законе Фиттса [14].

Тогда как в общем случае этот подход представляется непрактичным (приложений существует множество), большинство приложений имеет расположенный сверху многоуровневый заголовок. А операционная система имеет расположенную внизу слева кнопку «Пуск» или ее аналоги. Будем называть области расположения кнопки «Пуск» и заголовка программы (например, MS Word) предполагаемым интерфейсом. Оператор нажимает на кнопку «Пуск» или элемент меню заголовка, затем нажимает на следующий пункт. Время между этими двумя событиями характеризует его опытность, физиологическое состояние и является перспективным параметром для аутентификации.

Внизу экрана располагаются значки приложений (панель быстрого запуска). При движении курсора к этим элементам, также как к элементу закрытия окна экрана, оператор вначале промахивается и затем точно «наводит на цель». Можно рассчитать прямизну траектории  $str_k$  для  $k$  последних участков траектории (например,  $k=4$ ). Этот параметр, как и предыдущий, также непосредственно характеризует оператора.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрены и предложены некоторые новые временные и пространственные параметры модели работы оператора с мышью. Дальнейшая работа будет заключаться в преобразовании имеющихся общедоступных датасетов «сырых данных» (получении множества датасетов параметров), оценке эффективности различных классификаторов, методов их композиции, исследовании возможности редукции множества параметров без ухудшения качества классификации.

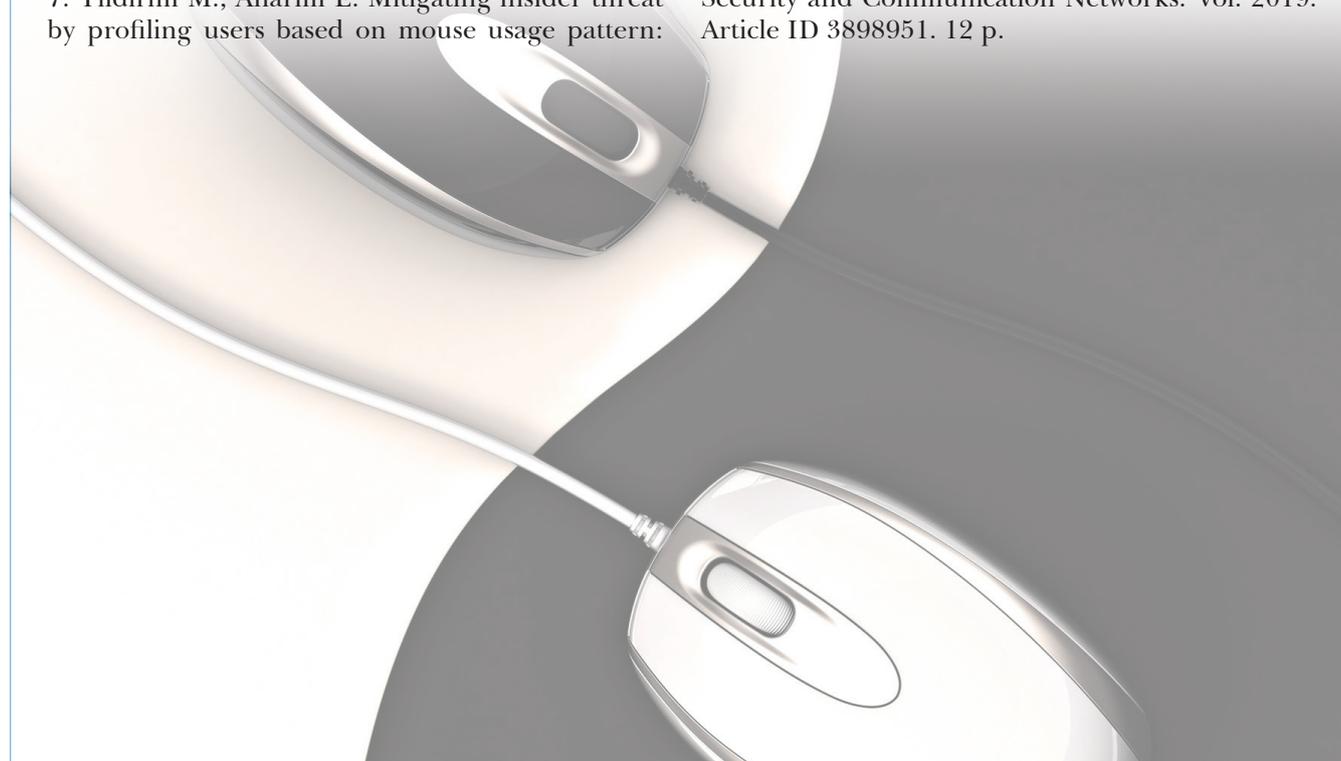
Кроме того, в ряде работ [8,15] изучаются

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

возможности аутентификации оператора по признакам работы с мышью на основе «сырых данных» при использовании в качестве классификаторов глубоких нейронных сетей, предназначенных для анализа одномерных и двумерных сигналов. Этому направлению исследований также будет уделено внимание. Возможно, лучшие результаты будут получены за счет объединения двух подходов.

### Литература

1. Грибунин В.Г., Чудовский В.В. Комплексная защита информация на предприятии: учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений М.: Издательский центр «Академия», 2009. 416 с.
2. Диденко С.М. Разработка и исследование компьютерной модели динамики системы «пользователь-мышь». Дисс. на соиск. ... канд. техн. наук. Томск, 2007. 95 с.
3. Bours P., Mondal S. Performance evaluation of continuous authentication systems // IET Biometrics, vol.4 (4). 2021. Pp.220-226.
4. Датасет Balabit [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/balabit/Mouse-Dynamics-Challenge> (дата обращения 10.08.2021).
5. Датасет Shen [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nskeylab.xjtu.edu.cn/people/cshen/data-sets/mouse-continuous-authentication/> (дата обращения 10.08.2021).
6. Датасет DFL [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ms.sapientia.ro/~manyi/DFL.html> (дата обращения 10.08.2021).
7. Yildirim M., Anarim E. Mitigating insider threat by profiling users based on mouse usage pattern: ensemble learning and frequency domain analysis // International Journal of Information Security. May, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10207-021-00544-9>.
8. Antal M., Fejer N. Mouse dynamics based user recognition using deep learning // Acta Univ. Sapientiae, Informatica. Vol.12. Issue 1. 2020. Pp. 39-50.
9. Antal M., Egyed-Zsigmond E. Intrusion detection using mouse dynamics. IET Biom. 8, 2019. Pp.285-294.
10. Gamboa H., Fred A. A behavioral biometric system based on human computer interaction // In Proceedings of SPIE. Vol.5404. 2004. Pp. 381-392.
11. Zheng N., Paloski A., Wang H. An efficient user verification system using angle-based mouse movement biometrics // ACM Trans. Inf. Syst. Secur. (TISSEC). №18(3). 2016. Pp. 1-27.
12. Almalki S., Roy K., Chatterjee P. Continuous Authentication Using Mouse Clickstream Data Analysis / In Book: Security, Privacy, and Anonymity in Computation. Communication and Storage, 2019. Pp.76-85.
13. Salman O., Hameed S. Using Mouse Dynamics for Continuous User Authentication / In book: Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC), 2018. Pp.776-787.
14. Еременко А.В., Левитская Е.А., Сулавко А.Е., Самотуга А.Е. Разграничение доступа к информации на основе скрытого мониторинга пользователей компьютерных систем: непрерывная идентификация // Вестник СибАДИ, 2014. Вып.6(40).
15. Hu T., Niu W., Zhang X., Liu X., Lu J., Liu Y. An Insider Threat Detection Approach Based on Mouse Dynamics and Deep Learning // Hindawi Security and Communication Networks. Vol. 2019. Article ID 3898951. 12 p.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.931

## ОБОБЩЕННЫЕ КАСКАДНЫЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЕ КОДЫ В РАСПОЗНАВАНИИ ОБРАЗОВ

## GENERALIZED CASCADE NOISE- TOLERANT CODES IN IMAGE RECOGNITION

Владислав Валентинович Квашенников

доктор технических наук

ведущий научный сотрудник

АО «КНИИТМУ»

Адрес: 248000, г. Калуга, ул. К. Маркса, д. 4

Тел.: 8 (4842) 743-500

### Аннотация

В статье рассмотрено распознавание образов на основе кодирования и декодирования помехоустойчивых кодов. Входные воздействия кодируются помехоустойчивыми кодами, разрешенные последовательности которых соответствуют образам, а запрещенные последовательности разделяют образы между собой. Разрешенные последовательности образа образуют сферу образа, позволяющую определять образ при наличии ошибок и стираний. Разделение (сегментация) сложных образов на простые образы позволяет представлять сложные образы в виде обобщенных каскадных помехоустойчивых кодов. Декодирование обобщенных каскадных кодов при небольшой мощности компонентных кодов может выполняться переборными методами с использованием библиотеки эталонных образов либо с помощью обученных на эталонных образах нейронных сетей. Для повышения помехоустойчивости возможно итеративное декодирование обобщенных каскадных кодов. Параллельное декодирование компонентных кодов повышает быстродействие распознавания образов.

**Ключевые слова:** кодирование входных воздействий, распознавание образов, обобщенные каскадные коды, сфера образа, итеративное декодирование образов.

### Summary

The article deals with pattern recognition based on the encoding and decoding of generalized cascade noise-tolerant codes. Input effects are encoded by noise-resistant codes, the allowed sequences of which correspond to the images, and the forbidden sequences divide the images among themselves. The allowed image sequences form the image sphere, which allows you to define the image in the presence of errors and erasures. Decoding of generalized cascade codes with a small power of component codes can be performed by selective methods using a library of reference images or using neural networks trained on reference images. To increase the noise immunity, iterative decoding of generalized cascade codes is possible. Parallel decoding of component codes increases the speed of image recognition. The study of the principles of encoding and decoding images based on generalized cascade codes is important in the recognition of images.

**Keywords:** coding of input actions, pattern recognition, generalized cascade codes, image sphere, iterative image decoding.

### Введение

В настоящее время наблюдается активизация теоретических и прикладных исследований в области распознавания образов. Их целью является создание систем, обрабатывающих колоссальные объемы информации в режиме реального времени и определяющих зрительные, звуковые и др. образы. Одним из важных критериев является высокая точность распознавания образов в условиях зашумленности и их неполного описания [1]. Информацию об окружающих образах система получает с помощью видеокамер, микрофонов и других датчиков, преобразующих воздействие окружающей среды (света, звука и т.д.) в электрические сигнала-

лы, которые без ограничения общности можно закодировать последовательностями символов. Последовательности символов подвергаются обработке, в результате получают образы, инвариантные к аффинным преобразованиям (масштабированию, сдвигу, вращению), к цветности и яркости [2]. Распознавание образов также инвариантно к ошибочному и неполному описанию образов. Не слишком большое число ошибок и стираний позволяет правильно распознавать образы. Поэтому, последовательности, соответствующие образам, можно считать помехоустойчивыми кодами, при декодировании которых с коррекцией ошибок и стираний выполняется распознавание образов. Информационная часть

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

помехоустойчивого кода представляет собой эффективный (сжатый) код образа, однозначно определяющий образ. Размер эффективного кода образа зависит от числа образов системы распознавания.

В статье предлагается распознавание образов на основе итеративного декодирования обобщенных каскадных помехоустойчивых кодов. Образы представляют помехоустойчивыми кодами, которые задают путем перечисления эталонных образов и соответствующих кодовых слов (табличным путем). Для распознавания образов выполняют переборное декодирование кода. Сложность такого декодирования быстро возрастает с увеличением числа эталонных образов, но ее можно уменьшить разбиением сложных образов на простые образы (сегментирование), число которых значительно меньше. Сложным образам будут соответствовать обобщенные каскадные помехоустойчивые коды, компонентные коды которых есть простые образы. Для декодирования обобщенных каскадных кодов используются библиотеки эталонных простых образов и библиотеки эталонных сложных образов. Для повышения помехоустойчивости применяется итеративное декодирование кода. Помимо переборного декодирования можно использовать декодирование на основе обучаемых нейронных сетей.

### Кодирование образов

Последовательности символов можно разбить на два класса: осмысленные или разрешенные последовательности, воспринимаемые как образы, и не имеющие смысла или запрещенные последовательности [3]. Допустим  $O_i$  – некоторый образ, множество образов  $O = \{O_i\}$ , множество разрешенных последовательностей  $A = \{A_i\}$ , а множество запрещенных последовательностей  $B = \{B_i\}$ . Множество всех последовательностей  $\Omega = A \cup B$ .

Множество разрешенных последовательностей данного образа образуют сферу образа. Последовательности сферы образа, несмотря на некоторое различие между ними, воспринимаются как один и тот же образ. Длина последовательности символов, соответствующей некоторому образу  $O_i$ , например зрительному образу, может быть очень большой, не меньше десятков тысяч, а иногда и миллионов бит. Со сферой образа связано понятие эталонной последовательности образа, которой является последовательность, находящаяся в центре сферы образа. Сфера образа позволяет определять образ даже в случае, если последовательность символов отличается от последовательности эталонного образа. При

искажении или стирании некоторого числа символов последовательности, образ еще остается внутри сферы образа. Сферы образов разделяются между собой достаточно большим числом запрещенных последовательностей.

На множестве образов можно задать метрику. Наиболее простой и естественной метрикой для двоичных цифровых последовательностей является метрика Хемминга, равная числу символов, в которых одна последовательность отличается от другой [4]

$$Xe(A_j, A_k) = \sum_{i=0}^{n-1} a_{ji} \oplus a_{ki}, \quad (1)$$

где  $\oplus$  – сумма по модулю два;

$n$  – длина последовательности символов образа.

Эталон образа находится в центре сферы образа, на минимальном расстоянии от остальных разрешенных последовательностей сферы образа

$$A_e = A_i : \min(Xe(A_i \oplus A_j)), \quad A_i, A_j \in O_k.$$

Размером или радиусом сферы образа будет максимальное расстояние между эталоном образа и последовательностями сферы

$$R = \max(Xe(A_e \oplus A_i)), \quad A_i \in O.$$

Расстояние между образами  $O_i$  и  $O_j$  есть минимальное расстояние между сферами образов

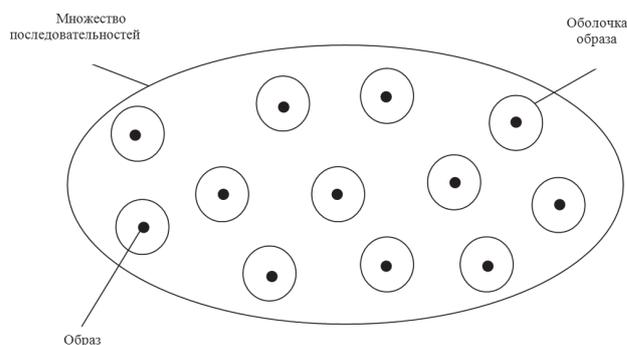
$$d(O_i, O_j) = \min(Xe(A_i \oplus A_j)), \quad A_i \in O_i, A_j \in O_j.$$

Кодирование образа заключается в отображении образа в последовательность символов помехоустойчивого кода и иллюстрируется *рисунке 1*.

Мощность множества всех последовательностей символов больше мощности сфер множества образов и значительно больше мощности множества образов. Последовательности, соответствующие разным образам, отличаются друг от друга в достаточно большом числе символов и их можно считать помехоустойчивыми кодами образов. Помехоустойчивые коды образов задаются таблицей соответствия образов и последовательностей символов

$$O_i \rightarrow A_i, \quad i = 0 \dots 2^k, \quad k < n.$$

где  $k$  – информационная длина кода.



**Рис. 1.** Кодирование образов

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Последовательности, соответствующие образам с некоторым приближением можно считать псевдослучайными последовательностями или стохастическими помехоустойчивыми кодами, символы которых генерируются по случайному закону. В любом случае удобно пользоваться довольно простыми оценками помехоустойчивости стохастических кодов. Стохастические коды являются помехоустойчивыми кодами с высокой корректирующей способностью и большой сложностью декодирования [5]. В середине прошлого века К. Шеннон доказал, что для случайного кодирования при определенных условиях вероятность ошибочного декодирования убывает по экспоненте с увеличением длины кода [6]. Декодирование стохастических кодов для большого числа кодовых слов практически нереализуемо, поскольку сложность переборного декодирования этих кодов с увеличением информационной длины кода растет очень быстро (по экспоненте). Избыточность кода  $n-k$  можно разделить на две части. Первая часть избыточности соответствует сфере образа, а вторая часть – запрещенным комбинациям, как представлено на рисунке 2.

Общее число двоичных последовательностей составляет  $2^n$ , из которых только  $M = 2^k < 2^n$  слов принадлежат коду. С учетом сферы образа число разрешенных последовательностей, соответствующих образам

$$M_1 = (1 + C_n^1 + C_n^2 + \dots + C_n^t)M, \quad (2)$$

где  $t$  – число корректируемых ошибок.

Для небольшой скорости стохастического кода и достаточно большой его длине минимальное кодовое расстояние оценивают

$$d = \frac{n}{2}.$$

Кратность корректируемых и обнаруживаемых кодом ошибок

$$t < \frac{d}{2}, \quad t < s \leq \frac{n}{2} - 2t.$$

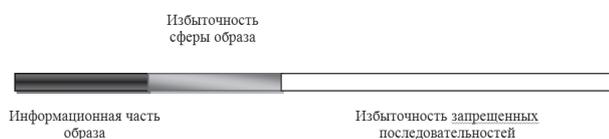
Вероятность правильного декодирования образа

$$P_1 = \sum_{i=0}^t C_n^i p^i (1-p)^{n-i}, \quad (3)$$

где  $p$  – средняя вероятность ошибки символа кодового слова.

Вероятность стирания образа

$$P_2 = \sum_{i=t+1}^s C_n^i p^i (1-p)^{n-i}, \quad (4)$$



**Рис. 2.** Последовательность образа

и вероятность неправильного декодирования образа

$$P_3 = 1 - P_1 - P_2. \quad (5)$$

Помехоустойчивый код задается параметрами  $(n, k, d)$ , которые справедливы и при задании образа и от которых зависит достоверность распознавания образа. При достаточно большом числе корректируемых кодом ошибок вероятность правильного декодирования образа будет близка к 1, а вероятность неправильного декодирования образа – ничтожно мала. При  $n=10000$ ,  $p=0.005$ ,  $t=100$ , согласно (3)...(5), справедливо

$$P_1 > 1 - 10^{-12}, P_2 < 10^{-12}, P_3 < 10^{-14}.$$

Благодаря большой избыточности помехоустойчивые коды образа однозначно определяют образ, несмотря на большое число ошибок в кодовом слове. Огромное число запрещенных последовательностей обеспечивает малую вероятность ложного образа.

### Декодирование образов

Декодирование помехоустойчивых кодов образов есть отображение разрешенных последовательностей в образы

$$\{A_i\} \rightarrow O_i, \quad i = 0 \dots 2^k, k < n.$$

Образы, входящие в полное множество образов можно условно разделить на простые образы и сложные образы. Сложные образы строятся на основе простых образов или других сложных образов. Простые образы не разделяются на другие образы. Простые образы имеют небольшое число эталонных образов, что позволяет использовать переборное декодирование. Для упрощения распознавания сложных образов довольно часто используют сегментацию образов [7]. Сложный образ  $B$  разбивают на простые образы  $A_1 A_2 \dots A_k$

$$B = \cup A_i.$$

Информационная часть помехоустойчивого кода простого образа есть эффективный код этого образа. Эффективный код сложного образа  $N$  можно получить через эффективные коды простых образов  $N_i$   $i=1 \dots m$ , например, используя позиционную систему исчисления

$$N = \sum_{i=1}^m N_i d^{i-1}, \quad (6)$$

где  $d$  – основание позиционной системы, где  $d \geq N_i$   $i=1 \dots m$ .

Полное множество образов также является образом. Переборное декодирование можно применять при небольшом числе кодовых слов даже, если длина кодового слова будет очень большой [8]. Образы представим двоичным кодом

$$A = a_1 a_2 \dots a_n, \quad a_i \in GF(2), \quad i = 1 \dots n.$$

Допустим, мощность кода ограничена неко-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

торым не слишком большим числом  $M$ . Перечислим все слова кода

$$B = B_1 B_2 \dots B_M,$$

где

$$B_i = b_{i1} b_{i2} \dots b_{in}, \quad b_{ji} \in GF(2).$$

Декодирование будет заключаться в сравнении кодового слова со всеми неискаженными (эталонными) словами кода и выборе того слова, для которого расстояние Хемминга будет минимальным

$$A := B_i \rightarrow \min_j \sum (a_j \oplus b_{ji}), \quad i=1..M. \quad (7)$$

При мягком декодировании для сравнения кодовых слов можно использовать расстояние Евклида. Сравнение означает вычисление корреляции между входным образом и эталонными образами.

При декодировании требуется выполнить примерно  $H=n \cdot M$  сравнений символов кодовых слов и столько же операций сложения. Величина  $H$ , определяющая число операций при распознавании образа, есть сложность образа.

Схема, реализующая переборное декодирование образов, представлена на рисунке 3.

Для распознавания образов часто используют нейронные сети. В настоящее время развивается декодирование помехоустойчивых кодов, основанное на нейронных сетях [9,10]. Интерес к применению нейронных сетей в задаче декодирования кодов возник еще в 80-х годах [11]. Однако в то время возможности нейронных сетей были существенно ограничены, и их можно было использовать только для декодирования простейших кодов. В последние годы потенциал элементной базы и нейронных сетей на их основе значительно вырос. Появилось множество архитектур и эффективных алгоритмов реализации различных нейронных сетей [12]. Свойствами нейронных сетей является возможность обучения и обобщения на данные, которые не встречались в процессе обучения, а также параллельная обработка информации, обеспечивающая их высокое быстродействие. Заметный прогресс в декодировании кодов намечился с

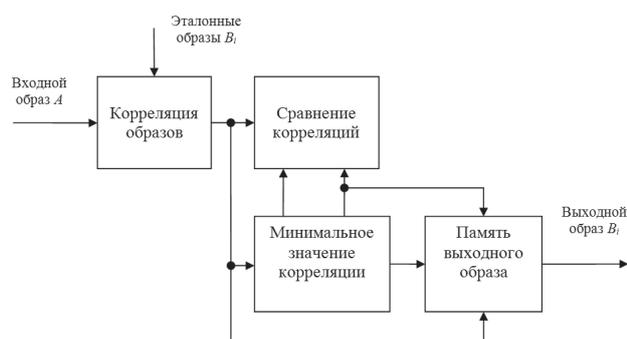


Рис. 3. Схема переборного декодирования образов

пользованием глубоких сверточных нейронных сетей [13].

Нейронная сеть может быть использована для декодирования любых помехоустойчивых кодов с исправлением ошибок и обнаружением стираний, без задания соответствующих правил кодирования. Такой декодер является универсальным, не слишком сложен в реализации и обучаем для различных наборов кодовых слов [14]. Нейросетевой декодер показал высокие результаты по обнаружению и исправлению ошибок, которые близки к декодированию за пределами минимального кодового расстояния. Однако, увеличение числа кодовых слов усложняет декодирование. Глубокое обучение на основе сверточных нейронных сетей сталкивается с «проклятием размерности»: слишком большое число кодовых слов требует большого времени, чтобы обучиться на них. Сложность нейронного декодера, как и переборного декодирования, быстро возрастает при увеличении информационной длины кодовых слов. Нейронная сеть играет роль универсального обучаемого преобразователя последовательностей символов, реализуя функцию получения эффективного кода образа.

### Обобщенные каскадные коды образов

Каскадные помехоустойчивые коды были предложены в качестве длинных кодов с высокой помехоустойчивостью и относительно небольшой сложностью декодирования [15]. Сложные образы строятся на основе простых образов, каждый из которых можно рассматривать как помехоустойчивый код. Множество простых образов можно считать внешними компонентными кодами обобщенного каскадного кода, а построение сложного образа, используя простые образы, есть внутреннее кодирование обобщенного каскадного кода. Сложные образы часто имеют иерархическую структуру, включающую большое число вложенных уровней и сложный образ можно представить в виде обобщенного каскадного помехоустойчивого кода.

Обобщенный каскадный код первой степени кодирования  $B^{(0)}$  с параметрами  $(n_1, q_1, \dots, q_{r-1}, d_1)$  есть объединение  $q_1$  различных кодов  $B_i^{(1)}$  ( $0 \leq i_1 \leq q_1 - 1$ ), где код  $B_i^{(1)}$  имеет параметры  $(n_2, q_2, \dots, q_{r-1}, d_2)$ . Каждый код второй степени  $B_i^{(1)}$  должен быть объединением  $q_2$  различных кодов  $B_{i_2}^{(2)}$  ( $0 \leq i_2 \leq q_2 - 1$ ), где код  $B_{i_2}^{(2)}$  имеет параметры  $(n_2, q_2, \dots, q_{r-1}, d_2)$  и т.д. Наконец, каждый код предпоследней степени  $B_{i_2 \dots i_{r-2}}^{(r-2)}$  является объединением  $q_{r-1}$  различных кодов последней степени  $B_{i_2 \dots i_{r-1}}^{(r-1)}$  ( $0 \leq i_{r-1} \leq q_{r-1} - 1$ ), имеющих параметры  $(n_{r-1}, q_{r-1}, d_{r-1})$ .

Можно записать рекуррентные соотношения для кодов различных ступеней кодирования [16]

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$B^{(0)} = \bigcup_{i_1=0}^{q_1-1} B_{i_1}^{(1)}; \quad B_{i_1}^{(1)} = \bigcup_{i_2=0}^{q_2-1} B_{i_1 i_2}^{(2)}, \dots,$$

при этом  $d_1 < d_2 < \dots < d_r$ .

Многие наилучшие известные помехоустойчивые коды получают как обобщенные каскадные коды [17]. Могут использоваться только две ступени кодирования, но иногда применяют и большее число ступеней кодирования. Увеличение числа ступеней кодирования весьма существенно уменьшает число кодовых слов на последней ступени кодирования, а значит, и сложность декодирования.

Обобщенные каскадные коды допускают итеративное декодирование [18]. Шаг декодирования начинают с кодов последней ступени, поднимаясь до кодов первой ступени, исправляя или стирая кодовые слова. По окончании декодирования кодов всех ступеней, в случае, если не были исправлены все коды первой ступени, декодирование обобщенного каскадного кода повторяется и т.д. до тех пор, пока либо все кодовые слова первой ступени не будут исправлены, либо пока очередной шаг декодирования не перестанет улучшать результаты предыдущего шага декодирования [19].

Сложность декодера снижается за счет того, что коды последней ступени кодирования, с которых начинается декодирование, имеют небольшое число кодовых слов, т.е. небольшое число эталонных простых образов. Например, если требуется идентифицировать человека по его лицу, то сначала распознаются простые образы лица человека: нос, рот, глаза, лоб, подбородок, особые приметы и т.д. Распознавание простых образов выполняется по библиотеке простых образов, разбитой на разделы, содержащих соответствующие эталонные простые образы. Затем на основе простых образов формируется сложный образ лица, с высокой вероятностью определяющей человека. При числе простых образов лица, равном 8, и мощности каждого простого образа – 16, число различных лиц будет примерно равно  $16^8 \approx 5 \cdot 10^9$ , что соизмеримо с числом людей на Земле. Эффективный код сложного образа лица, согласно (6), определяют по эффективным кодам простых образов. Эффективный код сложного образа в позиционной системе исчисления с основанием 16

$$N = N_1 + N_2 \cdot 16 + \dots + N_m \cdot 16^{m-1}.$$

По коду сложного образа, используя библиотеку лиц, распознают человека и определяют его данные. В библиотеке сложных образов похожие лица можно расположить вблизи друг от друга (на одной полке). Это позволяет на следующих шагах итеративного декодирования рас-

смотреть различные варианты декодирования простых образов и найти наиболее подходящий сложный образ [20].

Для инвариантности образов к ошибкам и стираниям коды должны иметь большую избыточность, т.е. быть длинными, а для уменьшения сложности декодирования коды должны иметь небольшое число кодовых слов. Сегментация образов на основе иерархического разбиения сложных образов на простые образы, а затем переход от эффективных кодов простых образов к кодам сложных образов уменьшает сложность распознавания образов.

### Заключение

В статье описано распознавание образов на основе декодирования обобщенных каскадных помехоустойчивых кодов. Данный подход раскрывает универсальный механизм построения сложных образов с помощью простых образов и во многих случаях проще традиционных подходов. Входные воздействия кодируются последовательностями символов, которые разделяются на разрешенные и запрещенные последовательности. Разрешенные последовательности соответствуют образам или сферам образов. Запрещенные последовательности разделяют сферы образов между собой. Большая избыточность последовательностей позволяет надежно определять образы, даже при ошибках или стираниях символов входных последовательностей. Последовательности символов, соответствующие образам, можно считать помехоустойчивыми корректирующими кодами. На основе простых образов по иерархическому принципу конструируются сложные образы, которые можно рассматривать как обобщенные каскадные помехоустойчивые коды. Небольшое число кодовых слов компонентных кодов обобщенных каскадных кодов позволяет использовать переборные методы декодирования кодов и нейронные сети. Для повышения помехоустойчивости кодов можно использовать итеративное декодирование. Высокое быстродействие обеспечивается параллельной обработкой большого числа входных образов. Исследование принципов кодирования и декодирования образов является важным для построения эффективных алгоритмов распознавания образов.

### Литература

1. Абрамов Н.С., Фраленко В.П., Хачумов М.В. Обзор методов распознавания образов на основе инвариантов к яркостным и геометрическим преобразованиям // Современные наукоемкие технологии, 2020. №6-1. С.110-117.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

2. Зуй Т.Н. Инварианты в задачах распознавания графических образов // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика, 2016. №1. 2016. С.76-85.
3. Потапов А. Системы компьютерного зрения: современные задачи и методы // Control Engineering, 2014. № 1. С.20-26.
4. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки: Пер. с англ. / Под ред. Р. Л. Добрушина и С. И. Самойленко. М.: Мир, 1976. 594 с.
5. Осмоловский С.А. Стохастические методы защиты информации М.: Радио и связь, 2003. 320 с.
6. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь. М.: Сов. Радио, 1974. 720 с.
7. Гибсон У. Распознавание образов. М.: Вильямс, 2015. 384 с.
8. Морелос-Сарагоса М. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005. 320 с.
9. Горбань А.Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей // Сибирский журнал вычислительной математики, 1998. Т.1. №1. С.12-24.
10. Хайкин С. Нейронные сети: 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
11. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. Кн.1, под ред. А.И. Галушкина. М.: ИПРРЖР, 2000. 416 с.
12. Beaty R. E., Benedek M., Wilkins R. W., Jauk E., Fink A., Silvia P. J., Hodges D. A., Koschutnig K., Neubauer A.C. Creativity and the default network: a functional connectivity analysis of the creative brain at rest (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25245940>) (англ.) // Neuropsychologia, 2014. November (vol. 64). Pp. 92-98.
13. Вассерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.: Мир, 1992. 236 с.
14. Николенко С., Кадуриин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
15. Форни Г.Д. Каскадные коды. Пер. с англ./ Под ред. С.И. Самойленко. М.: Мир, 1970. 205 с.
16. Мак-Вильямс, Ф. Дж., Слоэн Н.Дж.А. Теория кодов, исправляющих ошибки. Пер. с англ. М.: Связь, 1979. 744 с.
17. Зиновьев В.А. Обобщенные каскадные коды // Проблемы передачи информации, 1976. Т.12. Вып.1. С.5-15
18. Блох Э.Л., Зяблов В.В. Обобщенные каскадные коды. М.: Связь, 1976. 240 с.
19. Andreasen N.C. A journey into chaos: creativity and the unconscious. (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21694961>) (англ.) // Mens Sana Monographs, 2011. January (vol.9, № 1). Pp. 42-53.
20. Edeldkamp S., Schrödl S. Heuristic search: theory and applications. Morgan Kaufmann Publishers, 2012. P. 712.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.182

## ОБ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЯХ МУЛЬТИНАРНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ НЕАБЕЛЕВЫХ АЛГЕБР

## ON THE EXCEPTIONAL PECULIARITIES OF MULTINAR COMPLEX NON-ABELIAN ALGEBRAS

**Геннадий Германович Волков**  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
старший научный сотрудник  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967)35-31-93  
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

**Сергей Владимирович Смуров**  
почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, профессор  
Первый Вице-президент Института –  
Главный конструктор  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967)35-31-93  
E-mail: Svs\_iif@mail.ru

### Аннотация

В данной статье мы продолжаем цикл изучения мультинарных комплексных неабелевых алгебр и их приложений в квантовой физике и квантовой информации. В качестве примера рассмотрены исключительные особенности и фундаментальные представления неабелевой тернарной алгебры  $tsu(3)$  с соответствующей группой симметрий  $TSU(3)$ , возникающие из теории тернарных неабелевых чисел-мааркрионов, которые являются естественным обобщением кватернионов. Одним из интересных свойств алгебры  $tsu(3)$ , по сравнению с алгеброй  $su(3)$ , является наличие трех фундаментальных неприводимых представлений. Необычные свойства тернарной алгебры  $tsu(3)$  и группы  $TSU(3)$  в рамках квадратных и кубических матриц открывают новые возможности расширения ряда основных положений квантовой физики и квантовой информации, таких как расширение комплексного сопряжения, транспонирования, эрмитовости, унитарности, антикоммутируемости с возможными расширениями в физике принципа тождественности, принципа суперпозиции и необычных спинорных квантовых свойств невидимой материи и композитной материи кварков и лептонов. Абелевы и неабелевы алгебры и группы симметрии, которые мы открывали для описания кудитов, являются последовательными компонентами бесконечной цепочки  $n$ -арных обобщений хорошо известных алгебр  $su(3) \rightarrow tsu(3)$ ,  $su(4) \rightarrow qsu(4)$ ...

**Ключевые слова:** квантовая физика, квантовая информатика, алгебры Ли, группы Ли, мультинарные алгебры и группы, неприводимые представления, некоммутативность, унитарность, эрмитовость, транспонирование, комплексные числа.

### Summary

In this article, we continue the cycle of studying multinary complex non-abelian algebras and their applications in quantum physics and quantum information.. As an example, we consider the structure and some fundamental representations of a non-Abelian ternary  $tsu(3)$  with the corresponding symmetry group  $TSU(3)$  arising from the theory ternary complex non-abelian complex numbers- maarcrons, which are a natural generalization of quaternions. One of the interesting properties of the algebra  $tsu(3)$ , in comparison with the algebra  $su(3)$ , is the presence of three fundamental irreducible representations. The unusual properties of the ternary algebra  $tsu(3)$  and the  $TSU(3)$  group within the framework of square and cubic matrices open up new possibilities for expanding a number of basic provisions of quantum physics and quantum information, such as expanding the concepts of complex conjugation, transposition, Hermiticity, unitarity, anticommutativity with possible extensions in physics of the principle of identity, the principle of superposition and consideration of unusual spinor quantum properties of invisible matter and composite matter of quarks and leptons. Abelian and non-Abelian algebras and symmetry groups that we discovered to describe qudits are successive components of an infinite chain of  $n$ -ary generalizations of the well-known algebras  $su(3) \rightarrow tsu(3)$ ,  $su(4) \rightarrow qsu(4)$ ...

**Keywords:** quantum physics, quantum informatics, Lie algebras, Lie groups, multinary algebras and groups, irreducible representations, non-commutativity, unitarity, hermiticity, transposition, complex numbers.

**Введение. Мистический мир  
комплексных чисел о квантовой  
запутанности микромира и вселенной**  
В нескольких наших статьях [1-7] мы обсуж-

дали пути расширения основ квантовой физики [8]. Важнейшие в нашем обсуждении вопросы касались расширения поля комплексных чисел и всего огромного набора понятий и результа-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тов, связанных с ним, и прежде всего, таких как Гильбертово пространство, комплексное сопряжение, транспонирование, эрмитовость, унитарность, антикоммутируемость и т.д. [1-7,9-15] Весь математический фундамент квантовой физики стоит на теории бинарных комплексных чисел [8]. Группа  $U(1_{EM})$ -электромагнитного поля – это преобразование, связанное с умножением волновых функций на комплексное число по модулю один  $\exp(i\epsilon\alpha(x))$ . Алгебра  $su(2)$  связана с гиперкомплексными числами-кватернионами, которые были введены как три единичные не коммутирующие мнимые единицы  $i, j, k$  [8,16-18]. Ее алгебра для нас является сверхважной, так как ее неприводимые представления  $(2s+1)$ -размерности представляют кубиты  $s=1/2$ , кутриты  $s=1$ , кварклеты  $s=3/2$  и т.д. Все алгебры  $su(n)$  унитарных групп  $SU(n)$  высшего ранга строятся на базе простых корней, связанных с  $su(2)$ -подалгебрами [16-18]. Наши идеи и выбранное нами направление мы уже обсуждали в цикле статей [1-7], посвященных расширению самого понятия комплексного числа, и вытекающих отсюда следствий для построения новых алгебр и групп, новых многомерных групповых поверхностей. Обычные комплексные числа связаны с комплексификацией 2-мерной евклидовой плоскости. Наше направление – это комплексификация  $n$ -мерных евклидовых пространств с помощью циклических конечных групп  $C_n$  и дальнейшее обобщение на неабелевы  $n$ -арные гиперкомплексные числа для последующего создания новых неабелевых  $n$ -арных алгебр и сопутствующих им  $n$ -арных групп  $n=3,4,\dots$  [1-7,9-16].

Мультиарные ( $n=3,4,5,6,\dots$ ) алгебры и группы симметрий открывают новые возможности к решению проблем в космологии (Вселенная до Большого Взрыва и после внутри радиуса 380 000 световых лет и темная материя/энергия [19]), в Стандартной Модели кварков и лептонов (три вида кварк-лептонных поколений [20] и многомерные свойства трех-нейтринного состояния [21-24], трех цветовая кварковая модель строения адронов и «запирание цвета» внутри адронов [25]), в квантовой информации (запутывание и телепортация с многомерными квантовыми состояниями – кутриты, кварклеты и т.д.) [26,1-7,9-15]. Для сохранения арсенала всей квантовой теории на базе бинарных комплексных чисел с дополнительным включением теории тернарных комплексных чисел, можно отталкиваться от комплексификации 6-ти мерных евклидовых пространств [1-7,21-24].

Новая математика повлечет создание новой физики и, наоборот тоже верно. Мы уже наблюдали

дали в недавней истории как аппарат квантовой физики драматически переплелся с идеями абстрактной математики [8]. Так комплексные (гиперкомплексные) числа, комплексные (гиперкомплексные) алгебры и группы самым тесным образом вошли в описание квантовых состояний физических систем – кубиты, кутриты и т.д. в комплексных проективных пространствах  $CP^n(n=1,2,\dots)$  [5-7]. Достаточно хорошо освоив управление кубитами на 2-мерной сфере Блоха, следующим шагом стала необходимость продвигаться в изучение многомерных проективных пространств, 4-х ( $CP^2$ ) и выше пространственных измерений  $CP^n(n=3,4,\dots)$ . В результате оказалось, что в теории квантовой информации возникают те же проблемы, что и в физике сверхвысоких энергий кварков-лептонов и нейтрино в Стандартной Модели с калибровочной симметрией  $SU(3^c) \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  [1-7]. В частности можно отметить важность группы  $SU(3)$  в обеих дисциплинах.

Так многообразие Ли группы  $SU(3)$  уже восьмимерная гиперповерхность, которая должна быть связана с возможностями управления кутритами, возникающими в различных направлениях квантовой информатики. В теории 10-мерных суперструн при компактификации 6-ти дополнительных измерений 10-мерного пространства на 6-мерные пространства Калаби-Яу с  $SU(3)$  голономией возникли графы Берже, которые потребовали понимания их связи с сингулярностями  $SU(3)/G$ ,  $G$ -дискретная подгруппа  $SU(3)$  [27]. И именно с этой калибровочной группой симметрией  $SU(3^c)$  возникли огромные трудности в решении 55-летней проблемы записывания кварков и цветовых квантовых состояний внутри протонов, нейтронов и вообще в адронах. Впервые этот эффект записывания был достоверно обнаружен в специальных экспериментах на Серпуховском ускорителе с энергией протонов 76 ГэВ в 1968-70 гг. Или зачем природе понадобилось утроение мира, то есть существование 3-х кварк-лептонных поколений, которые было предложено изучать в рамках спонтанно нарушенной калибровочной  $SU(3H)$ -симметрии [20,28]. Спонтанное нарушение калибровочной  $SU(3H)$ -симметрии требует значительный Хиггсовский сектор, динамика нарушения в котором приводит к 8-ми массивным калибровочным векторным бозонам с массами в области 10-100 ТэВ! [20,28].

### Вещественные и мультиарно-комплексные Ли алгебры и Ли группы

Группа Ли – это групповой объект в категории многообразий. В частности, действие Ли –

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

это действие группы в категории многообразий. (Линейная) алгебраическая группа над  $K$  (алгебраически замкнутая) – это групповой объект в категории алгебраических многообразий над  $K$ . Общая линейная группа  $GL(n, K)$   $n \times n$  обратимых матриц является группой Ли над полем  $K$  для  $K = \mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{T}\mathbb{C}, \dots$ . Когда  $K$  алгебраически замкнуто,  $GL(n, K)$  является алгебраической группой, действующей алгебраически на  $K^n$  и на проективном пространстве  $P(K^n) = P^{n-1}(K)$ . Алгебра Ли над  $k$  – это  $k$ -векторное пространство  $\hat{g}$ , снабженное билинейной операцией умножения:  $\hat{g} \otimes \hat{g} \rightarrow \hat{g}$ ,  $(X, Y) \rightarrow [X, Y] \in \hat{g}$ ,  $X, Y \in \hat{g}$ , которая удовлетворяет антисимметрии  $[X, Y] = -[Y, X]$  и тождеству Якоби  $[[X, Y], Z] + [Z, X], Y + [Y, Z], X = 0$ . Гомоморфизм алгебр Ли – это линейное отображение, сохраняющее скобку. Группы Ли, которые являются комплексными многообразиями, можно было бы получить исходя из Ли алгебр над комплексным полем  $k = \mathbb{C}$ , ассоциированных с комплексными группами Ли. Также можно связать алгебры Ли с алгебраическими группами, определенными над другими полями, то есть, изучать их с более общим выбором поля  $k$ , например над полем тернарных комплексных чисел. Есть и другие причины расширения Ли алгебры  $\hat{g}$  над полем вещественных чисел  $\mathbb{R}$  и рассматривать комплексификацию  $\hat{g}_{\mathbb{C}} = \hat{g} \otimes \mathbb{C}$ , которая является Ли алгеброй уже над полем комплексных чисел. Наш путь связан с расширением поля комплексных чисел до полей  $n$ -арных комплексных чисел с  $n = 3, 4, 5, \dots$  и соответственным  $n$ -арных алгебр  $\hat{g}_{\mathbb{T}\mathbb{C}} = \hat{g} \otimes \mathbb{T}\mathbb{C}$  и соответствующих групп симметрий, тернарно-комплексных многообразий и проективных пространств и т.д.

Гомоморфизм групп Ли должен учитывать как групповую структуру, так и структуру гладкого многообразия. Изоморфизм групп Ли – это гомоморфизм групп, который также является гомеоморфизмом (взаимно-однозначное непрерывное отображение). Если рассматривать конечномерное пространство  $V$  над полем  $\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{T}\mathbb{C}, \dots$  то автоморфизм группы  $\text{Aut}(V)$  пространства  $V$  может быть отождествлен с  $GL(n, \mathbb{R}), GL(n, \mathbb{C}), GL(n, \mathbb{T}\mathbb{C}), \dots, GL(n, \mathbb{N}\mathbb{C})$  и соответствующими матричными группами Ли. Представлением группы Ли  $G$  на конечномерное векторное пространство  $V$  над числовыми полями  $\mathbb{R}$  или  $\mathbb{C}$  является гомоморфизм групп Ли

$$\pi: G \rightarrow \text{Aut}(V).$$

К классическим группам Ли относится каждая замкнутая подгруппа группы  $GL(n, \mathbb{R})$  или  $GL(n, \mathbb{C})$ , являющаяся вещественной или, соответственно, комплексной группой Ли. Для матрицы  $A$  в  $GL(n, \mathbb{R})$  или в  $GL(n, \mathbb{C})$ , через  $A^T$  обо-

значим ее транспонирование. Аналогично, если  $A \in GL(n, \mathbb{C})$ ,  $A^* = \bar{A}^T$  – эрмитово сопряжение матрицы  $A$ . Специальная комплексная группа Ли  $SL(n, \mathbb{C}) := \{A \in GL(n, \mathbb{C}) | \det(A) = 1\}$  и ее алгебра Ли  $sl(n, \mathbb{C}) := \{A \in gl(n, \mathbb{C}) | \text{Tr}(A) = 0\}$ .

Заметим, что в реальной алгебре могут быть комплексные числа – например,  $su(n)$  содержит комплексные матрицы, но это вещественная алгебра, так как противном случае ограничение (анти) эрмитовскими матрицами не имело бы смысла. Комплексные алгебры можно рассматривать как комплексифицированные алгебры  $\hat{g}_{\mathbb{C}} = \hat{g} \otimes \mathbb{C}$ . На практике это означает, что сохраняется базис генераторов, но учитываются комплексные коэффициенты. Кроме того, отметим, что для данной комплексной алгебры Ли может существовать несколько вещественных алгебр, из которых строится комплексификация. Например,  $SU(n)$  и  $SL(n, \mathbb{R})$  являются вещественными формами  $SL(n, \mathbb{C})$ .

Можно вводить комплексные группы Ли двумя эквивалентными путями:

а) как комплексное многообразие с групповой структурой, определенной через голоморфные отображения;

б) как Ли группа, у которой скобка Ли есть комплекснобилинейна по отношению к комплексной структуре Ли алгебры  $sl(2, \mathbb{C}) := \{A \in gl(2, \mathbb{C}) : \text{tr} A = 0\}$ ,  $sl(2, \mathbb{C}) = su(2) \oplus isu(2)$ , алгебры группы  $SL(2, \mathbb{C}) := \{A \in GL(2, \mathbb{C}) : \det A = 1\}$ , можно рассматривать как комплексификацию вещественной алгебры  $su(2) := \{A \in gl(2, \mathbb{C}) : A + A^* = 0, \text{tr} A = 0\}$ , Ли алгебры компактной группы  $SU(2) := \{A \in GL(2, \mathbb{C}) : AA^* = 1, \det A = 1\}$ .

### Алгебра мааркрионов

В этой части мы следуем нашим предыдущим работам, где впервые стали изучать эту обширную тематику, которая начинается с теории новых коммутирующих абелевых  $n$ -арных чисел и неабелевых  $n$ -арных гиперчисел и последовательно уходит в их многомерный комплексный анализ, в новую геометрию, алгебру и группы симметрий с их теорией представлений. Как и следовало ожидать, мы встречаемся с необычными новыми следствиями голоморфности и гармоничности функций в  $n$ -арных комплексных пространствах, что означает и расширение понятий многомерных комплексных, гиперкелевских многообразий и векторных расслоений. Расширение понятия комплексного числа означает и выход на расширение понятий алгебр и ассоциированных с ними групп симметрий в полном изучении теории представлений как алгебр, так и групп. То, что непосредственно мы обнаружили, связано с расширением поня-

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тий антикоммутативности, транспонирования и унитарности.

В данном направлении мы останавливаемся на более детальном изучении алгебраических свойств тернарных гиперчисел, мааркрионов, являющихся продолжением теории кватернионов в бинарном случае гиперкомплексных чисел. Мы рассматриваем такие новые и необычные положения этого направления, как новые формы антикоммутативности гиперчисел, понятия тернарного комплексного сопряжения и тернарного транспонирования, и соответствующих этим понятиям – тернарной эрмитовости и тернарной унитарности, которые могут иметь важные применения в квантовой физике за порогом стандартной физики элементарных частиц-СМ кварков, лептонов, а скорее в новых формах композитности этих объектов, включая нейтрино, темную материю, новую фундаментальную материю.

Алгебра  $tsu(3)$  является вещественной формой алгебры  $gl(3, \mathbb{C})$ , которая определяется над полем тернарных комплексных чисел  $\mathbb{C}$ . Поле тернарных чисел строится с помощью тернарной мнимой единицы  $\omega: \omega^3 = \omega_0$  и комплексификации 3-х мерного Евклидова пространства  $\mathbb{R}^3$ :

$$z = x_0\omega_0 + x_1\omega + x_2\omega^2, \text{ автоморфизмы которого}$$

$$\pi_1: z \rightarrow \{\tilde{z}: \tilde{z} = \omega_0 x_0 + j\omega x_1 + j^2\omega^2 x_2\}$$

$$\pi_2: z \rightarrow \{\tilde{\tilde{z}}: \tilde{\tilde{z}} = \omega_0 x_0 + j^2\omega x_1 + j\omega^2 x_2\}$$

строятся на неприводимых представлениях циклической группы  $C_3$ , которые соответствуют следующему определению тернарному комплексного сопряжения тернарной мнимой единицы:

$$\omega^3 = \omega_0: \tilde{\omega} = j\omega, \tilde{\tilde{\omega}} = j^2\omega, \tilde{\tilde{\tilde{\omega}}} = \omega; j = \exp\left(\frac{2\pi i}{3}\right).$$

Единичные тернарные комплексные числа  $\|z\|^3 = z\tilde{z}\tilde{\tilde{z}} = 1$

образуют непрерывную 2-х параметрическую Абелеву тернарную группу, являющейся двумерной поверхностью  $r^2\rho=1$  [12], которая можно рассматривать, как естественное расширение группы  $U(1)$ , порождаемой единичными комплексными числами  $z=a+ib$ ,  $\|z\|^2 = zz^* = a^2 + b^2 = 1 \rightarrow U(1) = S^1$ . Расширение на тернарный неабелев случай происходит аналогично тому, как были открыты кватернионы  $\{u = x_0e_0 + x_1e_1 + x_2e_2 + x_3e_3\}$  с  $SU(2)$  группой и соответствующей ей  $su(2)$ -алгеброй, образуемой тремя генераторами-мнимыми единичными кватернионами  $\{e_1, e_2, e_3; e_i^2 = -1, e_1e_2e_3 = -1\}$ .

В тернарном неабелевом случае таких мнимых единиц будет восемь  $\{q_a: q_a^3 = q_{0^3} = 1, a=1, \dots, 8\}$  (см. таблицу 1), как и в алгебре кватернионов, строятся из двух тернарных мнимых единиц  $q_1$  и  $q_2$ , с тернарными правилами коммутации  $q_1q_2 = jq_2q_1$ ,

$q_2q_1 = j^2q_1q_2$ , генераторов этой градуированной алгебры мааркрионов [11]:

$$\{q_a | q_1, q_2, q_3 = jq_1^2q_2^2; q_4 = q_1^2, q_5 = q_2^2, q_6 = jq_1q_2; q_7 = j^2q_1q_2^2, q_8 = j^2q_1^2q_2\}, \quad (1)$$

со следующими свойствами относительно тернарного комплексного сопряжения:

$$\tilde{q}_a = jq_a, \tilde{\tilde{q}}_a = j^2q_a, \tilde{\tilde{\tilde{q}}}_a = q_a, j = 2\pi/3, 1 + j + j^2 = 0.$$

**Таблица 1**

Таблица умножения мнимых тернарных единиц, где сделаны следующие определения

$$q_3 = jq_1^2q_2^2, q_6 = jq_1q_2, q_7 = j^2q_1q_2^2, q_8 = j^2q_1^2q_2$$

x	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	$q_7$	$q_8$
$q_1$	$q_4$	$j^2q_6$	$jq_5$	$q_0$	$jq_7$	$j^2q_8$	$jq_3$	$j^2q_2$
$q_2$	$jq_6$	$q_5$	$j^2q_4$	$j^2q_8$	$q_0$	$jq_7$	$jq_1$	$j^2q_3$
$q_3$	$j^2q_5$	$jq_4$	$q_6$	$jq_7$	$j^2q_8$	$q_0$	$jq_2$	$j^2q_1$
$q_4$	$q_0$	$jq_8$	$j^2q_7$	$q_1$	$j^2q_3$	$jq_2$	$j^2q_5$	$jq_6$
$q_5$	$j^2q_7$	$q_0$	$jq_8$	$jq_3$	$q_2$	$j^2q_1$	$j^2q_6$	$jq_4$
$q_6$	$jq_8$	$j^2q_7$	$q_0$	$j^2q_2$	$jq_1$	$q_3$	$j^2q_4$	$jq_5$
$q_7$	$j^2q_3$	$j^2q_1$	$j^2q_2$	$jq_5$	$jq_6$	$jq_4$	$q_8$	$q_0$
$q_8$	$jq_2$	$jq_3$	$jq_1$	$j^2q_6$	$j^2q_4$	$j^2q_5$	$q_0$	$q_7$

### Матричная реализация мааркрионов

Тернарное транспонирование и тернарное обобщение «эрмитова» сопряжения. Восемь мнимых единиц  $a = \{1, \dots, 8\}$  можно представить в виде матриц  $3 \times 3: (q_a)^3 = 1_3$  [11]:

$$q_1 = \omega \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, q_2 = \omega^2 \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & j \\ j^2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, q_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & j^2 \\ j & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$q_4 = \omega^2 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, q_5 = \omega \begin{pmatrix} 0 & 0 & j \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & j^2 & 0 \end{pmatrix}, q_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & j^2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$q_7 = H_1 = \omega^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j^2 & 0 \\ 0 & 0 & j \end{pmatrix}, q_8 = H_2 = \omega \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & j \end{pmatrix}$$

которые относительно тернарного «эрмитова» сопряжения  $(q_a)^\dagger = \tilde{q}_a', a=1, 2, \dots, 8$ , включающего тернарные операции тернарного комплексного сопряжения и тернарного транспонирования матриц преобразуются соответствующим образом:

$$q_a^\dagger = jq_a, q_a^{\dagger\dagger} = j^2q_a, q_a^{\dagger\dagger\dagger} = q_a; a=1, 2, 3$$

$$q_a^\dagger = j^2q_a, q_a^{\dagger\dagger} = jq_a, q_a^{\dagger\dagger\dagger} = q_a; a=4, 5, 6$$

$$q_7^\dagger = q_7, q_7^{\dagger\dagger} = q_7^7, q_8^\dagger = q_8, q_8^{\dagger\dagger} = q_8, \quad (3)$$

Два вида тернарного транспонирования  $+ (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1)$  и  $(1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1)$ :

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \rightarrow A^{(1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1)} = \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{21} \\ a_{32} & a_{33} & a_{31} \\ a_{12} & a_{13} & a_{11} \end{pmatrix} \rightarrow A'' = \begin{pmatrix} a_{33} & a_{31} & a_{32} \\ a_{13} & a_{11} & a_{12} \\ a_{23} & a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \rightarrow A''' = A, \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \rightarrow A^{(1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1)} = \begin{pmatrix} a_{33} & a_{31} & a_{32} \\ a_{13} & a_{11} & a_{12} \\ a_{23} & a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \rightarrow A'' = \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{21} \\ a_{32} & a_{33} & a_{31} \\ a_{12} & a_{13} & a_{11} \end{pmatrix} \rightarrow A''' = A$$

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Рассмотрим первый вид транспонирования и покажем, что для любых  $3 \times 3$  матриц справедливо следующее равенство  $(AB)^t = A^t B^t$ . Так как это равенство необычное в смысле расположения матриц после тернарного транспонирования (при обычном бинарном транспонировании матрицы меняются местами расположения  $(AB)^T = B^T A^T$ , полезно провести прямые вычисления. При транспонировании первого случая (4) индексы всех матричных элементов увеличиваются на единицу по модулю 3, то есть  $a_{kp} \rightarrow a_{k+1,p+1}$ ,  $b_{kp} \rightarrow b_{k+1,p+1}$ :

$$A^t B^t = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}^t = \begin{pmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{21} \\ a_{32} & a_{33} & a_{31} \\ a_{12} & a_{13} & a_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{22} & b_{23} & b_{21} \\ b_{32} & b_{33} & b_{31} \\ b_{12} & b_{13} & b_{11} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} a_{22}b_{22} + a_{23}b_{32} + a_{21}b_{12} & a_{22}b_{23} + a_{23}b_{33} + a_{21}b_{13} & a_{22}b_{21} + a_{23}b_{31} + a_{21}b_{11} \\ a_{32}b_{22} + a_{33}b_{32} + a_{31}b_{12} & a_{32}b_{23} + a_{33}b_{33} + a_{31}b_{13} & a_{32}b_{21} + a_{33}b_{31} + a_{31}b_{11} \\ a_{12}b_{22} + a_{13}b_{32} + a_{11}b_{12} & a_{12}b_{23} + a_{13}b_{33} + a_{11}b_{13} & a_{12}b_{21} + a_{13}b_{31} + a_{11}b_{11} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$(AB)^t = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}^t = \quad (6)$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} + a_{13}b_{31} & a_{11}b_{12} + a_{12}b_{22} + a_{13}b_{32} & a_{11}b_{13} + a_{12}b_{23} + a_{13}b_{33} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} + a_{23}b_{31} & a_{21}b_{12} + a_{22}b_{22} + a_{23}b_{32} & a_{21}b_{13} + a_{22}b_{23} + a_{23}b_{33} \\ a_{31}b_{11} + a_{32}b_{21} + a_{33}b_{31} & a_{31}b_{12} + a_{32}b_{22} + a_{33}b_{32} & a_{31}b_{13} + a_{32}b_{23} + a_{33}b_{33} \\ a_{22}b_{22} + a_{23}b_{32} + a_{21}b_{12} & a_{22}b_{23} + a_{23}b_{33} + a_{21}b_{13} & a_{22}b_{21} + a_{23}b_{31} + a_{21}b_{11} \\ a_{32}b_{22} + a_{33}b_{32} + a_{31}b_{12} & a_{32}b_{23} + a_{33}b_{33} + a_{31}b_{13} & a_{32}b_{21} + a_{33}b_{31} + a_{31}b_{11} \\ a_{12}b_{22} + a_{13}b_{32} + a_{11}b_{12} & a_{12}b_{23} + a_{13}b_{33} + a_{11}b_{13} & a_{12}b_{21} + a_{13}b_{31} + a_{11}b_{11} \end{pmatrix}$$

Сравнивая выражения (5) и (6), убеждаемся в справедливости равенства  $(AB)^t = A^t B^t$ . Аналогично можно убедиться в справедливости второй цепочки транспонирования, при которой индексы матричных элементов уменьшаются на единицу по модулю 3. При тернарном транспонировании все 9 матричных элементов разбиваются на три группы по три элемента:  $(a_{11}, a_{22}, a_{33})$ ,  $(a_{12}, a_{23}, a_{31})$ ,  $(a_{21}, a_{32}, a_{13})$ , внутри которых согласованно происходят указанные перестановки одновременно по двум индексам либо по первой схеме, либо по второй. Совместное действие двух тернарных операций, тернарного транспонирования по второй схеме и тернарного комплексного сопряжения

$$\tilde{\omega} = j\omega, \tilde{\tilde{\omega}} = j^2\omega, \tilde{\tilde{\tilde{\omega}}} = \omega$$

можно трактовать как тернарное обобщение «эрмитова» сопряжения:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_1 &= jQ_1, \tilde{Q}_2 = j^2Q_2, \tilde{Q}_3 = Q_3 \\ \tilde{Q}_4 &= j^2Q_4, \tilde{Q}_5 = jQ_5, \tilde{Q}_6 = Q_6 \\ \tilde{H}_1 &= \tilde{Q}_7 = j^2Q_7 = j^2H_1 \\ \tilde{H}_2 &= \tilde{Q}_8 = jQ_8 = jH_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Выбрав для удобства вторую схему тернарного транспонирования, проведем процедуру тернарного «эрмитова» сопряжения (обозначение с помощью знака  $\tilde{\phantom{x}}$ ) над следующими 8 матрица-

ми, которые мы выберем в качестве образующих тернарную алгебру  $tsu(3)$ :

$$a_{12} \rightarrow b_{12} = a_{31}, a_{31} \rightarrow b_{31} = a_{23}, a_{23} \rightarrow b_{23} = a_{12}, \text{ по часовой стрелке;}$$

$$a_{13} \rightarrow b_{13} = a_{32}, a_{32} \rightarrow b_{32} = a_{21}, a_{21} \rightarrow b_{21} = a_{13}, \text{ против часовой стрелки;}$$

$$a_{11} \rightarrow b_{11} = a_{33}, a_{33} \rightarrow b_{33} = a_{22}, a_{22} \rightarrow b_{22} = a_{11},$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \rightarrow A^t = B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{33} & a_{31} & a_{32} \\ a_{13} & a_{11} & a_{12} \\ a_{23} & a_{21} & a_{22} \end{pmatrix},$$

$$Q_1 = \omega \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow (Q_1)^\dagger = j\omega \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} = j\omega Q_1, \quad (8)$$

$$Q_2 = \omega^2 \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & j \\ j^2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow (Q_2)^\dagger = j^2\omega^2 \begin{pmatrix} 0 & j^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ j & 0 & 0 \end{pmatrix} = jQ_2, \quad (9)$$

$$Q_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & j^2 \\ j & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow (Q_3)^\dagger = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ j^2 & 0 & 0 \end{pmatrix} = jQ_3, \quad (10)$$

$$Q_4 = \frac{\omega^2}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow (Q_4)^\dagger = j^2 \frac{\omega^2}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = j^2Q_4, \quad (11)$$

$$Q_5 = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & j \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & j^2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow (Q_5)^\dagger = j^2 \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & j \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & j^2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow j^2Q_5, \quad (12)$$

$$Q_6 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & j^2 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \end{pmatrix} \rightarrow (Q_6)^\dagger = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & j \\ j^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = j^2Q_6, \quad (13)$$

$$H_1 = Q_7 = \frac{\omega^2}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j^2 & 0 \\ 0 & 0 & j \end{pmatrix} \rightarrow (Q_7)^\dagger = \frac{j^2\omega^2}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j^2 & 0 \\ 0 & 0 & j \end{pmatrix}, \quad (14)$$

$$= j^2 \frac{\omega^2}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} j & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & j^2 \end{pmatrix} = j^2 \frac{\omega^2}{\sqrt{3}} j \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j^2 & 0 \\ 0 & 0 & j \end{pmatrix} = H_1,$$

$$H_2 = Q_8 = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & j^2 \end{pmatrix} \rightarrow (Q_8)^\dagger = \frac{j\omega}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & j^2 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$= \frac{j\omega}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} j^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & j \end{pmatrix} = j^3 \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & j^2 \end{pmatrix} = H_2$$

### Тернарная неабелева $tsu(3)$ алгебра

Генераторы тернарной неабелевой алгебры  $tsu(3) = \{Q_a \in gl(3, C^0) : \text{Tr} Q_a = 0, Q_a + Q_a^\dagger + Q_a^{\dagger\dagger} = 0, a = 1, \dots, 8\}$  образуют следующие коммутационные соотношения:

$$[Q_a, Q_b] = if_{ab,c} Q_c, \quad (16)$$

где коммутирующие генераторы  $H_1$  и  $H_2$  образуют алгебру Картана  $[H_1, H_2] = 0$ , а остальные 27-структурных констант разбиты на три группы (17), (18) и (19):

$$\begin{aligned} f_{17,3} = f_{27,1} = f_{37,2} = \omega^2; \quad f_{47,5} = f_{57,6} = f_{67,4} = -\omega^2 \\ f_{18,2} = f_{28,3} = f_{38,1} = -\omega \quad f_{48,6} = f_{58,4} = f_{68,5} = \omega \end{aligned}, \quad (17)$$

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$\begin{aligned} f_{14,x} = 0, f_{15,7} = \omega, f_{16,8} = -\omega^2 \\ f_{24,8} = -\omega^2, f_{25,x} = 0, f_{26,7} = -\omega, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} f_{34,7} = -\omega, f_{35,8} = -\omega^2, f_{36,x} = 0 \\ f_{12,6} = f_{23,4} = f_{31,5} = -1 \\ f_{45,3} = f_{56,1} = f_{64,2} = -1 \end{aligned} \quad (19)$$

Первая группа (17) структурных констант дает информацию о коммутационных соотношениях генераторов Картана ( $H_1, H_2$ ) с двумя выделенными тройками генераторов ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ) и ( $Q_4, Q_5, Q_6$ ) (см. таблицу 2).

**Таблица 2**

Коммутационные соотношения, определяющие корневую систему алгебры  $tsu(3)$

$[H_1, Q_1] = i\omega^2 Q_3$	$[H_2, Q_1] = -i\omega Q_2$
$[H_1, Q_2] = i\omega^2 Q_1$	$[H_2, Q_2] = -i\omega Q_3$
$[H_1, Q_3] = i\omega^2 Q_2$	$[H_2, Q_3] = -i\omega Q_1$
$[H_1, Q_4] = -i\omega^2 Q_5$	$[H_2, Q_4] = i\omega Q_6$
$[H_1, Q_5] = -i\omega^2 Q_6$	$[H_2, Q_5] = i\omega Q_4$
$[H_1, Q_6] = -i\omega^2 Q_4$	$[H_2, Q_6] = i\omega Q_5$

Вторая группа (18) структурных констант следует из следующей таблицы коммутационных соотношений между тройками генераторов ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ) и ( $Q_4, Q_5, Q_6$ ) (см. таблицу 3).

**Таблица 3**

Коммутационные соотношения между двумя тройками генераторов алгебры  $tsu(3)$

$[Q_1, Q_4] = 0$	$[Q_2, Q_4] = -i\omega^2 H_2$	$[Q_3, Q_4] = i\omega H_1$
$[Q_1, Q_5] = i\omega H_1$	$[Q_2, Q_5] = 0$	$[Q_3, Q_5] = -i\omega^2 H_2$
$[Q_1, Q_6] = -i\omega^2 H_2$	$[Q_2, Q_6] = i\omega H_1$	$[Q_3, Q_6] = 0$

Наконец, третья группа (17) структурных констант связана коммутационными соотношениями внутри каждой тройки генераторов ( $Q_1, Q_2, Q_3$ ) и ( $Q_4, Q_5, Q_6$ ) (см. таблицу 4).

**Таблица 4**

Коммутационные соотношения внутри каждой тройки генераторов алгебры  $tsu(3)$

$[Q_1, Q_2] = -iQ_6$	$[Q_4, Q_5] = -iQ_3$
$[Q_2, Q_3] = -iQ_4$	$[Q_5, Q_6] = -iQ_1$
$[Q_3, Q_1] = -iQ_5$	$[Q_6, Q_4] = -iQ_2$

Как и в случаях с бинарными группами  $su(n)$  для нахождения корневой системы необходимо перейти в диагональный базис

$$\lambda_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_1 + Q_2 + Q_3) \quad \eta_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_4 + Q_5 + Q_6)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_1 + jQ_2 + j^2Q_3) \quad \eta_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_4 + j^2Q_5 + jQ_6) \quad (20)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_1 + j^2Q_2 + jQ_3) \quad \eta_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_4 + jQ_5 + j^2Q_6)$$

В диагональном базисе преобразованную первую группу (17) коммутационных соотношений разобьем на две группы, группу коммутационных соотношений тройки генераторов  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  с генераторами  $H_1$  (21) и  $H_2$  (22):

$$[H_1, \lambda_1] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_1, Q_1] + [Q_2, Q_2] + [Q_3, Q_3]) = \frac{i\omega^2}{\sqrt{3}}(Q_1 + Q_2 + Q_3) = i\omega^2 \lambda_1$$

$$[H_1, \lambda_2] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_1, Q_1] + j[Q_2, Q_2] + j^2[Q_3, Q_3]) = \frac{i\omega^2}{\sqrt{3}}(Q_1 + jQ_2 + j^2Q_3) = ij\omega^2 \lambda_2$$

$$[H_1, \lambda_3] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_1, Q_1] + j^2[Q_2, Q_2] + j[Q_3, Q_3]) = \frac{i\omega^2}{\sqrt{3}}(Q_1 + j^2Q_2 + jQ_3) = ij^2\omega^2 \lambda_3$$

$$[H_2, \lambda_1] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_4, Q_4] + [Q_5, Q_5] + [Q_6, Q_6]) = -\frac{i\omega^2}{\sqrt{3}}(Q_4 + Q_5 + Q_6) = -i\omega^2 \lambda_1$$

$$[H_2, \lambda_2] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_4, Q_4] + j[Q_5, Q_5] + j^2[Q_6, Q_6]) = -\frac{i\omega^2}{\sqrt{3}}(Q_4 + jQ_5 + j^2Q_6) = -ij^2\omega^2 \lambda_2$$

$$[H_2, \lambda_3] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_4, Q_4] + j^2[Q_5, Q_5] + j[Q_6, Q_6]) = -\frac{i\omega^2}{\sqrt{3}}(Q_4 + j^2Q_5 + jQ_6) = -ij\omega^2 \lambda_3$$

$$[H_1, \lambda_1] = \frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_1 + Q_2 + Q_3) = i\omega \lambda_1$$

$$[H_1, \lambda_2] = \frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_1 + jQ_2 + j^2Q_3) = ij\omega \lambda_2 \quad (21)$$

$$[H_1, \lambda_3] = \frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_1 + j^2Q_2 + jQ_3) = ij^2\omega \lambda_3$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_1 + Q_2 + Q_3) \quad [H_2, \lambda_1] = -\frac{i\omega^2}{\sqrt{3}}(Q_2 + Q_3 + Q_1) = -i\omega^2 \lambda_1$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_1 + jQ_2 + j^2Q_3) \quad [H_2, \lambda_2] = -\frac{i\omega^2}{\sqrt{3}}(Q_2 + jQ_3 + j^2Q_1) = -ij^2\omega^2 \lambda_2 \quad (22)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_1 + j^2Q_2 + jQ_3) \quad [H_2, \lambda_3] = -\frac{i\omega^2}{\sqrt{3}}(Q_2 + j^2Q_3 + jQ_1) = -ij\omega^2 \lambda_3$$

Ниже приведем коммутационные соотношения для тройки генераторов  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  с генераторами  $H_1$  (23) и  $H_2$  (24):

$$[H_1, \eta_1] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_7, Q_4] + [Q_7, Q_5] + [Q_7, Q_6]) = -\frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_5 + Q_6 + Q_4) = -i\omega \eta_1 \quad (23)$$

$$[H_1, \eta_2] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_7, Q_4] + j^2[Q_7, Q_5] + j[Q_7, Q_6]) = -\frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_5 + j^2Q_6 + jQ_4) = -i\omega \eta_2$$

$$[H_1, \eta_3] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_7, Q_4] + j[Q_7, Q_5] + j^2[Q_7, Q_6]) = -\frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_5 + jQ_6 + j^2Q_4) = -i\omega j^2 \eta_3$$

$$[H_1, \eta_1] = -\frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_5 + Q_6 + Q_4) = -i\omega \eta_1$$

$$[H_1, \eta_2] = -\frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_5 + j^2Q_6 + jQ_4) = -i\omega \eta_2$$

$$[H_1, \eta_3] = -\frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_5 + jQ_6 + j^2Q_4) = -i\omega j^2 \eta_3$$

$$[H_2, \eta_1] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_8, Q_4] + [Q_8, Q_5] + [Q_8, Q_6]) = \frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_6 + Q_4 + Q_5) = i\omega^2 \eta_1$$

$$[H_2, \eta_2] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_8, Q_4] + j^2[Q_8, Q_5] + j[Q_8, Q_6]) = \frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_6 + j^2Q_4 + jQ_5) = i\omega^2 j^2 \eta_2$$

$$[H_2, \eta_3] = \frac{1}{\sqrt{3}}([Q_8, Q_4] + j[Q_8, Q_5] + j^2[Q_8, Q_6]) = \frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_6 + jQ_4 + j^2Q_5) = i\omega^2 j \eta_3$$

$$[H_2, \eta_1] = \frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_6 + Q_4 + Q_5) = i\omega^2 \eta_1$$

$$[H_2, \eta_2] = \frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_6 + j^2Q_4 + jQ_5) = i\omega^2 j^2 \eta_2$$

$$[H_2, \eta_3] = \frac{i\omega}{\sqrt{3}}(Q_6 + jQ_4 + j^2Q_5) = i\omega^2 j \eta_3 \quad (24)$$

Коммутационные соотношения (17) или (21)-(24) с картановскими генераторами позволяют

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

определить корневую систему алгебры  $\text{tsu}(3)$ :

$$\alpha_1 = (\omega, -\omega^2), \alpha_2 = (j\omega, -j^2\omega^2), \alpha_3 = (j^2\omega, -j\omega^2), \quad (25)$$

$$\alpha_4 = (-\omega, \omega^2), \alpha_5 = (-j\omega, j^2\omega^2), \alpha_6 = (-j^2\omega, j\omega^2), \quad (26)$$

Отметим, что  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  можно принять за старшие корни  $\alpha_2$  и  $\alpha_3 + \alpha^2 = \alpha_5$ .

Коммутационные соотношения (18) в диагональном базисе приобретают компактную форму, напоминающую корневую систему алгебры  $\text{su}(n)$

$$[\lambda_i, \eta_i] = (H_1 - H_2), [\lambda_2, \eta_2] = (j^2 H_1 - j H_2), [\lambda_3, \eta_3] = (j H_1 - j^2 H_2) \\ [\lambda_k, \eta_p] = 0, k \neq p, \quad (27)$$

Коммутационные соотношения (19) в диагональном базисе приобретают компактную форму

$$[\lambda_1, \lambda_2] = -\eta_3, [\lambda_2, \lambda_3] = -\eta_1, [\lambda_3, \lambda_1] = -\eta_2, \quad (28)$$

$$[\eta_1, \eta_3] = -\lambda_2, [\eta_3, \eta_2] = -\lambda_1, [\eta_2, \eta_1] = -\lambda_3$$

или еще компактнее

$$\begin{aligned} [\lambda_a, \lambda_b] &= -\varepsilon_{abc} \eta_c \\ [\eta_a, \eta_b] &= -\varepsilon_{abc} \lambda_c \end{aligned} \quad (29)$$

Используя совместно (29) и (30), можно эти соотношения переписать в виде двойных коммутационных соотношений отдельно для тройки  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$

$$[[\lambda_1, \lambda_2], \lambda_3] = (jQ_7 - j^2Q_8), [[\lambda_2, \lambda_3], \lambda_1] = (Q_7 - Q_8), \\ [[\lambda_3, \lambda_1], \lambda_2] = (j^2Q_7 - jQ_8), \quad (30)$$

$$[[\lambda_1, \lambda_2], \lambda_a] = 0, a = 1, 2; [[\lambda_2, \lambda_3], \lambda_a] = 0, \\ a = 2, 3; [[\lambda_3, \lambda_1], \lambda_a] = 0, a = 1, 3, \quad (31)$$

$$[[\lambda_1, \lambda_2], \lambda_3] + [[\lambda_2, \lambda_3], \lambda_1] + [[\lambda_3, \lambda_1], \lambda_2] = 0 \quad (32)$$

и отдельно для тройки генераторов  $(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ :

$$[[\eta_1, \eta_2], \eta_a] = 0, a = 1, 2; [[\eta_2, \eta_3], \eta_a] = 0, \\ a = 2, 3; [[\eta_3, \eta_1], \eta_a] = 0, a = 1, 3, \quad (33)$$

$$[[\eta_1, \eta_2], \eta_3] = (jQ_7 - j^2Q_8), [[\eta_2, \eta_3], \eta_1] = (Q_7 - Q_8), \\ [[\eta_3, \eta_1], \eta_2] = (j^2Q_7 - jQ_8), \quad (34)$$

$$[[\eta_1, \eta_2], \eta_3] + [[\eta_2, \eta_3], \eta_1] + [[\eta_3, \eta_1], \eta_2] = 0 \quad (35)$$

### Тернарные фундаментальные представления

Присоединенное представление, как всегда, определяется корневой системой, что и было показано в предыдущем параграфе. Для нахождения других представлений необходимо проводить поиск весовых векторов. В стандартном представлении, искомые три веса фундаментального представления алгебры  $\text{tsu}(3)$  строятся как 2-х компонентные векторы  $(\mu_a)_k$ ,  $a = 1, 2$ , компоненты которых определяются из собственных значений генераторов (14), (15)-абелевой Картановской подалгебры  $\text{tsu}(3)$  (в диагональном случае совпадают с диагональными элементами матриц):

$$H_1 = \frac{\omega^2}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j^2 & 0 \\ 0 & 0 & j \end{pmatrix}, H_2 = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & j^2 \end{pmatrix}$$

являющихся стандартными базисными элементами  $\mu_k$  для  $\text{TC}^3$

$$H_a e_k = (\mu_a)_k e_k, k = 1, 2, 3; a = 1, 2, \quad (36)$$

где

$$e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \mu_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(\omega^2, \omega), \quad (37)$$

$$e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \mu_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}(\omega^2 j^2, \omega j),$$

$$e_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \mu_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}(j\omega^2, \omega j^2)$$

для этой алгебры кроме стандартного представления существуют еще два сопряженных ему, действующих в  $(\text{TC})^3$ , веса которых следуют из определения  $H_a e_k = (\mu_a)_k e_k$ ,  $a = 1, 2$ :

$$\pi^{(1)} = \{ \mu_1 = (1/3)^{1/2}(\omega^2, \omega), \mu_2 = (1/3)^{1/2}(\omega^2 j^2, \omega j), \\ \mu_3 = (1/3)^{1/2}(j\omega^2, \omega j^2) \}, \quad (38)$$

$$\pi^{(2)} = \{ \mu_1 = (1/3)^{1/2}(j^2\omega^2, j\omega), \mu_2 = (1/3)^{1/2}(\omega^2 j, \omega j^2), \\ \mu_3 = (1/3)^{1/2}(\omega^2, \omega) \}, \quad (39)$$

$$\pi^{(3)} = \{ \mu_1 = (1/3)^{1/2}(j\omega^2, j^2\omega), \mu_2 = (1/3)^{1/2}(\omega^2, \omega), \\ \mu_3 = (1/3)^{1/2}(j^2\omega^2, \omega j) \} \quad (40)$$

и для другого выбора диагонализации

$$\chi_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_1 + Q_2 + Q_3) \quad (41)$$

$$\chi_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_1 + \omega Q_2 + \omega^2 Q_3)$$

$$\chi_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_1 + \omega^2 Q_2 + \omega Q_3)$$

$$\xi_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_4 + Q_5 + Q_6) \quad (42)$$

$$\xi_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_4 + \omega^2 Q_5 + \omega Q_6)$$

$$\xi_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}(Q_4 + \omega Q_5 + \omega^2 Q_6)$$

получаем следующие выражения

$$\rho^{(1)} = \{ \mu_1 = (1/3)^{1/2}(\omega^2, \omega), \mu_2 = (1/3)^{1/2}(\omega^2 j^2, \omega j), \\ \mu_3 = (1/3)^{1/2}(j\omega^2, \omega j^2) \}, \quad (43)$$

$$\rho^{(2)} = \{ \mu_1 = (1/3)^{1/2}(\omega, \omega^2), \mu_2 = (1/3)^{1/2}(\omega j^2, \omega^2 j), \\ \mu_3 = (1/3)^{1/2}(\omega j, \omega^2 j^2) \}, \quad (44)$$

$$\rho^{(3)} = \{ \mu_1 = (1/3)^{1/2}(1, 1), \mu_2 = (1/3)^{1/2}(j^2, j), \\ \mu_3 = (1/3)^{1/2}(j, j^2) \}, \quad (45)$$

Два других сопряженных представления связаны с тем, что можно найти две измененные формы генераторов  $Q_a$ , при которых структурные константы  $f_{ab,c}$  не меняются

$$[Q_a, Q_b] = if_{ab,c} Q_c \rightarrow [V_a, V_b] = if_{ab,c} V_c$$

Первое фундаментальное представление строится согласно следующим преобразованиям генераторов алгебры:

$$\pi^{(1)}(Q_a) = \{ V_a, a = 1, \dots, 8 | V_7 = jQ_7 = jH_1, V_8 = j^2Q_8 = j^2H_2 \\ V_1 = j^2Q_1, V_2 = jQ_2, V_3 = Q_3, V_4 = jQ_4, V_5 = j^2Q_5, V_6 = Q_6 \} \quad (46)$$

или

$$\rho^{(1)}(Q_a) = \{ V_a, a = 1, \dots, 8 | V_7 = \omega Q_7 = \omega H_1, V_8 = \omega^2 Q_8 = \omega H_2 \\ V_1 = \omega^2 Q_1, V_2 = \omega Q_2, V_3 = Q_3, V_4 = Q_4, V_5 = \omega^2 Q_5, V_6 = Q_6 \} \quad (47)$$

Второе фундаментальное представление строится аналогично, в котором структурные константы алгебры остаются неизменными

$$[Q_a, Q_b] = if_{ab,c} Q_c \rightarrow [Y_a, Y_b] = if_{ab,c} Y_c$$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Соответствует следующей цепочке преобразований генераторов

$$\pi^{(2)}(Q_a) = \{Y_a, a=1, \dots, 8 \mid Y_7 = j^2 Q_7 = j^2 H_1, Y_8 = j Q_8 = j H_2, Y_1 = Q_1, Y_2 = j Q_2, Y_3 = j^2 Q_3; Y_4 = Q_4, Y_5 = j^2 Q_5, Y_6 = j Q_6\} \quad (48)$$

или

$$\rho^{(2)}(Q_a) = \{Y_a, a=1, \dots, 8 \mid Y_7 = \omega^2 Q_7 = \omega^2 H_1, Y_8 = \omega Q_8 = \omega H_2, Y_1 = Q_1, Y_2 = \omega Q_2, Y_3 = \omega^2 Q_3; Y_4 = Q_4, Y_5 = \omega^2 Q_5, Y_6 = \omega Q_6\} \quad (49)$$

Легко убедиться, что все эти отображения действительно не меняют структурные константы алгебры  $\text{tsu}(3)$  и соответствуют двум дополнительным фундаментальным представлениям размерности три.

### Заключение

Мы проиллюстрировали наличие присоединенного представления алгебры  $\text{tsu}(3)$  с шестью ненулевыми корнями и дважды вырожденным нулевым корнем и трех фундаментальных представлений размерности три:  $n^{(1)}, n^{(2)}, n^{(3)}, (\rho^{(1)}, \rho^{(2)}, \rho^{(3)})$ -тернарной неабелевой алгебры  $\text{tsu}(3)$  группы  $\text{TSU}(3)$ . Это дает возможность рассматривать три цветных кварковых поколения в триплетах, как взаимно сопряженные относительно тернарного комплексного сопряжения. Алгебра марионионов позволяет ввести 8-мерное пространство единичных чисел:

$$z = x_0 q_0 + x_1 q_1 + \dots + x_8 q_8, \quad x_0, x_a \in \mathbb{R},$$

где мнимые тернарные единицы  $q_a; a=1, \dots, 8$ ; имеют более сложные, чем кватернионы  $e_a e_b = -e_b e_a, a \neq b$  коммутационные соотношения  $q_a q_b = j^k q_b q_a, j = \exp(2\pi i/3)$ , где значение  $k=1, 2$  зависит от выбора подгруппы образующих  $a, b = (1, 2, 3), (4, 5, 6)$ .

Сама гиперповерхность представляет собой  $\text{TSU}(3)$ -групповое многообразие. Эта группа и ее алгебра принципиально отличаются от Картан-Ли группы  $\text{SU}(3)$  и ее алгебры  $\text{su}(3)$ , определенной 8-ю образующими Гелл-Мана. Аналогично, рассматривая  $n=4, 5, 6, \dots$ -арные гиперкомплексные числа, можно построить  $n$ -арные алгебры и  $n$ -арные группы с соответствующими более сложными коммутационными соотношениями. Отметим, что помимо обсуждаемых бинарных коммутационных соотношений, 8-генераторов  $\text{tsu}(3)$  удовлетворяют тернарному коммутационному соотношению [6,7]

$$[XYZ] = XYZ + jYZX + j^2ZXY,$$

что является обобщением Ли алгебр и требует отдельной дискуссии.

### Литература

1. Царьков А.Н., Смуров С.В., Волков Г.Г., Масликов А.А., Капитонов И.Ю. Симметрично-групповые расширения аксиом квантовой физики в динамике квантовых систем // Известия Института инженерной физики, 2019. № 4(54). С.84-92.
2. Волков Г.Г., Масликов А.А., Царьков А.Н., Смуров С.В. О геометрии невидимого света вселенной // Известия Института инженерной физики, 2020. № 1(55). С.74-84.

3. Царьков А.Н., Смуров С.В., Волков Г.Г. Тернарные неабелевы симметрии о запутывании многомерных пространств // Известия Института инженерной физики, 2020. № 2(56). С.74-81
4. Смуров С.В., Волков Г.Г., Столбов С.Н., Царьков А.Н. Новые симметрии многомерной геометрии в квантовой физике и квантовой информации // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.85-94.
5. Волков Г.Г., Смуров С.В., Царьков А.Н. Многомерные комплексные проективные пространства в квантовой физике и квантовой информации // Известия Института инженерной физики, 2020. №4(58). С.84-94.
6. Волков Г.Г., Смуров С.В., Царьков А.Н. О проективных алгебраических многообразиях в торической геометрии и квантовой физике // Известия Института инженерной физики, 2020. №4(59). С.73-86.
7. Волков Г.Г., Масликов А.А., Смуров С.В. О генеалогическом древе квантовых состояний в торической проективной геометрии // Известия Института инженерной физики, 2020. №4(60). С.91-96.
8. Боголюбов Н.Н., Логунов А.А., Оксак А.И., Тодоров И.Т. Общие принципы квантовой теории поля. М.: Наука, 1987. 616 с.
9. G. Volkov. On the complexifications of the Euclidean  $R_n$  spaces and the  $n$ -dimensional generalization of Pythagor theorem, arXiv: 1006.5630 [math-ph] (2010).
10. V. Samoylenko and G.Volkov. The GUT of the light: On the Abelian Complexifications of the Euclidean  $R_n$  spaces, arXiv: 0912.2037 [physics.gen-ph].
11. G. Volkov. Ternary "Quaternions" and Ternary  $TU(3)$  algebra, arXiv: 1006.5627 (2010).
12. Lipatov L.N., M. Rausch de Traunbenberg, Volkov G. On the ternary complex analysis and its applications. J. Math. Phys. 49, 013502 (2008). P.28.
13. Смуров С.В., Волков Г.Г., Глотова И.О., Кукин Н.С., Мурадова А.Р. Математические вопросы расширения основ квантовых теорий // Известия Института инженерной физики, 2015. №4(38). С.71-84.
14. Смуров С.В., Волков Г.Г., Глотова И.О., Кукин Н.С., Мурадова А.Р. Введение в геометрию  $N$ -арных комплексных чисел // Известия Института инженерной физики, 2016. №2(40). С.75-84.
15. Волков Г.Г., Кукин Н.С., Мурадова А.Р., Глотова И.О. Тернарная групповая алгебра. Комплексный анализ в Евклидовом пространстве // Известия Института инженерной физики, 2016. №3(41). С.50-56.
16. Kostrikin A. Algebra, Iv, IIv, IIIv, 2000.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

17. Zuber J.B. Invariances in Physics and Group Theory, 2013.
18. Исаев А.П., Рубаков В.А. Теория групп и симметрий: Конечные группы. Группы и алгебры Ли. М.: URSS, 2018. 504 с.
19. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. М.: URSS, 2020. 616 с.
20. Maslikov A.A., Sergeev S.M., Volkov G.G. NonAbelian gauge family symmetry in rank 8-16 grand unified string theories // Phys. Rev. D15. V.15. 1994.
21. Ammosov V., Volkov G. Can Neutrinos Probe Extra Dimensions? arXiv:hep-ph/0008032 (2000).
22. Volkov G.G. Geometry of Majorana neutrino and new symmetries., Annales de la Fondation Louis de Broglie, Vol. 31 No 2-3, 2006. p.227, arXiv:hep-ph/0607334.
23. Volkov G. The Possible Signals from the D=6 Space-Time, arXiv:1112.3583 (2011).
24. Baranov D.S., Volkov G.G. Neutrino On The Possible New Time Structure, arXiv:1302.1482 (2013).
25. Maslikov A., Volkov G. Ternary  $SU(3)$ -group symmetry and its possible applications in hadron-quark substructure. Towards a new spinor-fermion structure "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics" (Baldin ISHEPP XXIV) Dubna, Russia, Sept 17-22, 2018 EPJ Web of Conf.v. 204 (2019).
26. Волков Г.Г., Масликов А.А., Смуров С.В., Царьков А.Н. О многокубитных схемах запутывания и телепортации на основе NV-центров в алмазе // Известия Института инженерной физики, 2019. №2(52). С.103-105.
27. Dubrovskiy A., Volkov G. Ternary numbers and algebras. Reflexive numbers and Berger graphs, Adv.Appl.Clifford Algebras 17, 159-181 (2007).
28. H.D. Dahmen, A.A. Maslikov, I.A. Naumov, T. Stroh, G.G. Volkov. Grand Unified Theories in Superstrings in the Free World-Sheet Fermion Formulation.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.932.2

## МОНИТОРИНГ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРАПИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТЕРМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

## THERAPY EFFICIENCY MONITORING BASED ON THERMOGRAPHIC IMAGES

37°C



### Мария Михайловна Авдеева

младший научный сотрудник МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: knazeva\_marya@list.ru

### Андрей Константинович Никитин

инженер-программист МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: ex\_nik@mail.ru

### Лариса Николаевна Хижняк

кандидат медицинских наук  
научный сотрудник  
ФГБУ науки «Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики» РАН  
Адрес: 142290, Московская обл.,  
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3  
Тел.: 8 (495) 632-78-69  
E-mail: office@iteb.ru

### Евгений Павлович Хижняк

доктор физико-математических наук  
научный сотрудник  
ФГБУ науки «Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики» РАН  
Адрес: 142290, Московская обл.,  
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3  
Тел.: 8(495)632-78-69  
E-mail: office@iteb.ru

### Ирина Андреевна Якимова

кандидат технических наук  
старший преподаватель  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д.17  
Тел.: +7 (905) 517-03-23  
E-mail: dmitriyyak@mail.ru

### Аннотация

В статье обсуждается методика, позволяющая контролировать эффективность терапии с помощью термографических изображений. Использование инфракрасных камер вместо рентгеновских снимков позволяет применять данную методику на пациентах с медицинскими и другими ограничениями по состоянию здоровья.

**Ключевые слова:** матричное тепловидение, термографические изображения, область поражения.

### Summary

In the paper discussed methodology that helps to monitoring therapy efficiency using thermographic images. Instead of xray, using of IR cameras allow to use this methodology on patients with medical and other health restrictions.

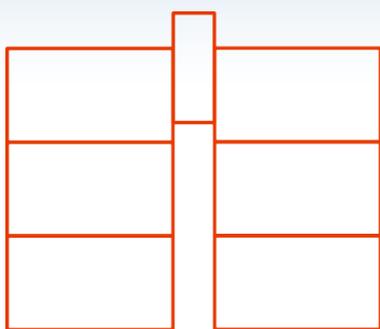
**Keywords:** matrix thermal imaging, thermographic images, the affected area.

Эпидемиологическая обстановка, сложившаяся сегодня в мире, требует эффективных и своевременных решений, позволяющих оперативно реагировать на изменения ситуации в здравоохранении при оценке здоровья населения. На помощь медицине приходят новые технологии оценки состояния пациентов. Одной из таких технологий является матричное тепловидение, позволяющее неинвазивно локализовать очаги воспалений и первично определять потенциально наиболее значимые участки для лечения заболевания. Термографические изображения являются исходными объектами для анализа при использовании матричного тепловидения.

Ввиду множества факторов и, в том числе, отсутствия симптоматики – важным является факт наличия патологии и ее своевременная оценка. Множественное использование рентгенографии при этом, способно навредить пациенту, поэтому применение термографических изображений позволяет использовать настоящую методику неограниченное количество раз без ущерба нанесения потенциального вреда.

В настоящей статье, рассмотрена методика оценки поражения легких на основе термографических изображений. Используя подход, изложенный в [1], формируется опорный контур легких, представленный на рисунке 1.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



**Рис. 1.** Опорный контур «легкие»

Контур сепарирован на блоки для разделения долей каждого легкого. Такое разбиение позволяет точнее определять показатели при анализе термографического изображения специалистом.

На рисунке 2 представлены термографические изображения человека с поражением легких (пневмония) в различных (а, б, в) частях легких. Формируем морфологию контура для каждого случая в отдельности.

Тогда, исходя из [1], исходные изображения примут вид:

$$P_n = \{p_{rgb}(x, y) \mid x=1:w, y=1:h\}, \quad (1)$$

где  $n$  – индекс термографического изображения;  
 $p_{rgb}(x, y)$  – значение пикселя в соответствующей точке рассматриваемого термографического изображения  $n$ ;  
 $w$  – ширина входного блока термографического изображения;

$h$  – высота входного блока термографического изображения.

Так как каждый опорный контур разбит на блоки, в соответствии с [1] формируем обтравочные слои:

$$I_{n_i} = \{I_{rgb}(x, y) \mid x=p_x:p_x+p_w, y=p_y:p_y+p_h\}, \quad (2)$$

где  $i$  – индекс блока в рассматриваемом термографическом изображении;

$p_x$  – смещение области интереса по оси  $x$  в рассматриваемом термографическом изображении;

$p_y$  – смещение области интереса по оси  $y$  в рассматриваемом термографическом изображении;

$p_w$  – ширина блока;

$p_h$  – высота блока.

Соответственно, используя выражение (9) из [1], с учетом (1) и (2) имеем:

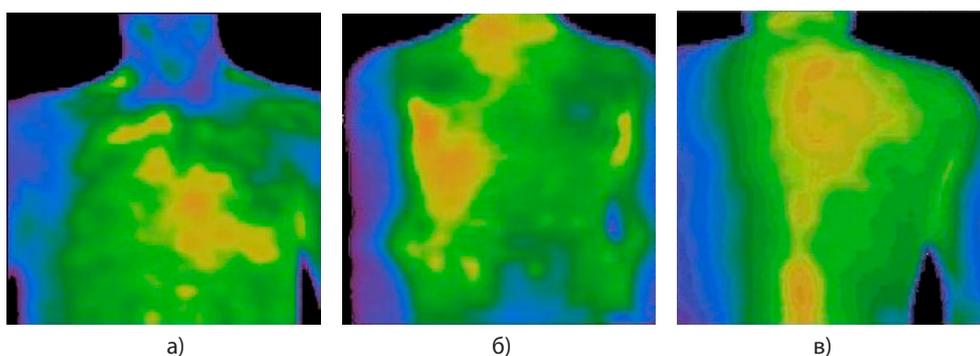
$$H_{n_i} = \sum_{i=1}^{|I_{rgb}(x,y)|} I_{rgb}(x, y) \cdot \left( \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2^b} \right), \quad (3)$$

где  $b$  – максимальная глубина яркости входного изображения (1);

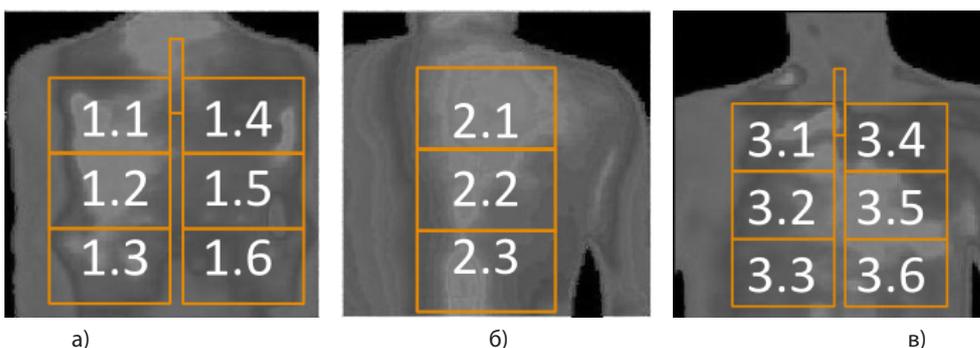
$i$  – индекс элемента термографической гистограммы.

Результатом применения (3) на (1) для каждого из патологических изображений представленных на рисунке 3, будет набор отдельных гистограмм, конкретизируя которые специалист может эффективно наблюдать изменения при проведении терапии на различных участках легкого.

Полученные на рисунках 4-6 гистограммы позволяют анализировать потенциальные области поражения не только легких, но и других частей



**Рис. 2.** Термографические снимки поражения легких



**Рис.3.** Термографические снимки с наложенными контурами и их индексацией

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

тела. Неинвазивность методики, позволяет проводить исследования неограниченное количество раз, что при наличии противопоказаний является наиболее безопасным средством исследования патологии и ее динамики. Эффективное применение тепловых шаблонов [4], позволяет широко использовать методику при наблюдении пациентов с разнообразными патологиями, уровень залегания которых в тканях не превышает потенциальных возможностей используемого матричного инфракрасного устройства получения термографических изображений.

### Литература

1. The Medical Use of Infrared-Thermography History and Recent Applications, Reinhold BERZ, Deutsche Gesellschaft für Thermographie und

Regulationsmedizin, Hilders / Rhön Helmut SAUER, Deutsche Gesellschaft für Thermographie und Regulationsmedizin, Waldbronn, Thermografie-Kolloquium, 2007. Vortrag 04.

2. Thermal Imaging in Medical Science, N.Dey, A.S. Ashour, A.S.Althoupey, IGI Global, DOI 10.4018/978-1-5225-5204-8, 2017.

3. Никитин А.К., Хижняк Л.Н. Термографические гистограммы на основе опорных контуров в медицинских изображениях // Известия Института инженерной физики, 2019. №3(53). С.101-103.

4. Khizhnyak E.P., Ziskin M.C. Heating patterns in biological tissue phantoms caused by millimeter wave electromagnetic irradiation. IEEE Transaction on Biomedical Engineering, 1994. Vol. 41. №9. Pp. 857-873.

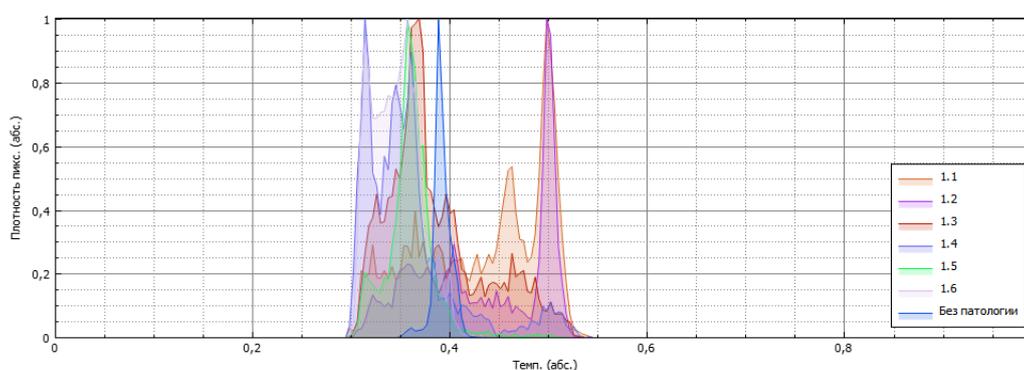


Рис. 4. Гистограммы для случая «а» рисунка 3

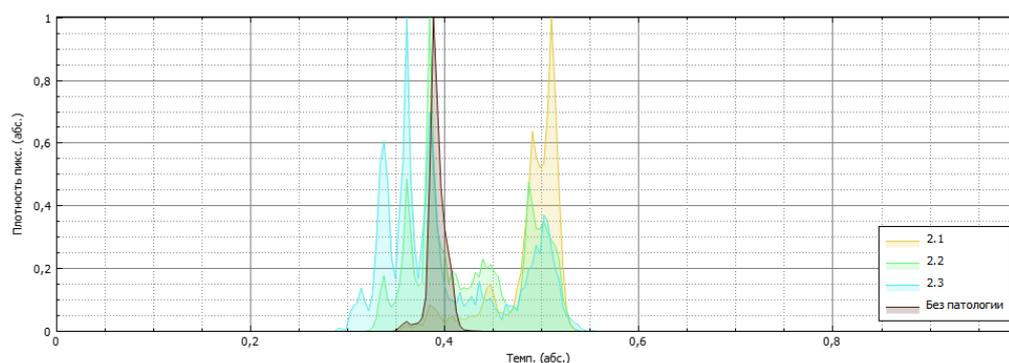


Рис. 5. Гистограммы для случая «б» рисунка 3

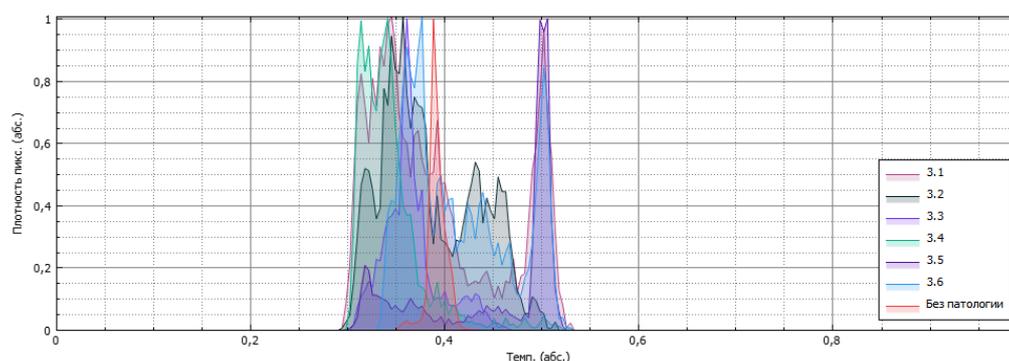


Рис. 6. Гистограммы для случая «в» рисунка 3

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.056

## СПОСОБ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ТИПА МЕЖСЕТЕВОЙ ЭКРАН ТРЕБОВАНИЯМ ПО БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ НЕЧИСЛОВУЮ СТРУКТУРУ

## A METHOD FOR ASSESSING THE COMPLIANCE OF INFORMATION SECURITY TOOLS SUCH AS A FIREWALL WITH INFORMATION SECURITY REQUIREMENTS BASED ON INDICATORS THAT HAVE A NON-NUMERICAL STRUCTURE

Елена Николаевна Паршина

начальник испытательной лаборатории  
МОУ «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7 (4967) 35-31-93

### Аннотация

В статье рассматривается способ оценки соответствия средств защиты информации типа межсетевой экран требованиям по безопасности информации на основе показателей, имеющих нечисловую структуру, с использованием математического аппарата нечеткой логики. Предложен подход формализации параметров, характеризующих показатели выполнения требований по безопасности информации для межсетевых экранов.

**Ключевые слова:** лингвистическая переменная, терм-множество лингвистических переменных, межсетевой экран.

### Summary

The article discusses a method for assessing the compliance of information security tools such as a firewall with information security requirements based on indicators that have a non-numerical structure, using the mathematical apparatus of fuzzy logic. An approach is proposed for formalizing the parameters characterizing the performance indicators of information security requirements for firewalls.

**Keywords:** linguistic variable, term-a set of linguistic variables, firewall, security against unauthorized access.

В настоящее время наблюдается существенный рост преступлений в области информационных технологий связанных с применением новейших технологий, направленных на нарушение конфиденциальности, целостности и доступности информации. Для нейтрализации угроз информационной безопасности используются различные типы средств защиты информации, в том числе устройства типа межсетевой экран (МЭ).

Важнейшим аспектом выполнения требований по безопасности информации в составе информационных систем является требования по применению сертифицированных МЭ, реализующих функции защиты информации в зависимости от заданных требований.

Требования по безопасности информации, предъявляемые к МЭ, определяются нормативными документами федеральных органов (ФСТЭК России, Минобороны России и ФСБ России).

В настоящее время, по мнению автора, наиболее полные и структурированные требования

по безопасности информации к МЭ определены в нормативных документах ФСТЭК России, таких как «Требования к межсетевым экранам» (утверждены приказом ФСТЭК России № 9 от 25.03.2016 г.). В указанном документе определены требования к МЭ, в том числе к аппаратным платформам, на которых они функционируют. Требования по безопасности информации к МЭ определяются перечнем решаемых функциональных задач и грифом обрабатываемой информации. Реализация конкретных требований к конкретным МЭ определяются в профилях защиты (ПЗ), которые в свою очередь содержат в себе набор функциональных требований и требований доверия к МЭ по средствам набора соответствующих компонентов. Компонент представляет собой элементарную совокупность требований (функциональных или требований доверия) подлежащих реализации в МЭ заданного класса.

Важнейшим аспектом оценки соответствия МЭ требованиям, установленным в нормативных документах, является процедура сертифици-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

кационных испытаний в аккредитованных испытательных лабораториях. Задача испытательной лаборатории в рамках проведения сертификационных испытаний состоит в том, чтобы установить факт, насколько предъявленный МЭ соответствует заданным требованиям установленного класса. В ходе проведения испытаний эксперты испытательной лаборатории проводят анализ на предмет реализации функциональных требований или требований доверия в МЭ, и на основании проведенных работ делается вывод о степени соответствия МЭ требованиям, установленным в нормативных документах, в частности ФСТЭК России.

Сертификационные испытания МЭ могут проводиться с применением средств автоматизации так и без таковых. Средства автоматизации позволяют провести экспресс анализ соответствия МЭ заданным требованиям по выделенной совокупности отдельных компонентов ПЗ, однако имеющийся в настоящее время инструментарий испытательных лабораторий не позволяет автоматизировать процесс оценки в полном объеме заданных требований.

Конечную оценку соответствия требованиям по безопасности информации МЭ заданного класса устанавливает эксперт испытательной лаборатории, и мнение эксперта, безусловно, носит субъективный характер.

В данной статье предлагается способ оценки соответствия МЭ заданного класса с использованием параметров, имеющих нечисловую структуру, требованиям нормативных документов по безопасности информации.

С целью оценки соответствие МЭ требованиям по безопасности информации целесообразно выделить параметры двух типов, а именно:

- параметры качественной оценки (параметры, характеризующие функциональные требования и требования доверия);
- параметры, характеризующие степень соответствия установленным требованиям.

Для формализации информации по параметрам указанного типа целесообразно ввести лингвистические переменные:

- $y_i = \text{«КОМПОНЕНТ»}$ ;
- $z_k = \text{«СООТВЕТСТВИЕ»}$ .

Тогда пусть

$$Y = \{y_i | i = \overline{1, I}\} -$$

множество параметров, характеризующих соответствие МЭ установленным требованиям. Для обеспечения возможности формализации качественной информации о таких параметрах будем рассматривать каждый такой параметр  $y_i \in Y$  как лингвистическую переменную  $\langle y_i, T_j, D_j \rangle$  с названием «КОМПОНЕНТ<sub>*i*</sub>» [4].

Тогда  $y_i$  представляет собой лингвистическую переменную с названием «КОМПОНЕНТ». То есть  $y_i = \text{«КОМПОНЕНТ}_i\text{»}$ . Множество значений лингвистической переменной образуют терм-множество. Для лингвистической переменной  $y_i$  терм-множество обозначим через  $T_i = \{T_{ij} | j = \overline{1, J_i}\}$ . Тогда  $T_{ij}$  представляет собой  $j$ -е значение  $i$ -й лингвистической переменной «КОМПОНЕНТ<sub>*i*</sub>», а  $J_i$  по своей сути равнозначно мощности множества  $T_i$  ( $|T_i| = J_i$ ) или общее число различных значений лингвистической переменной «КОМПОНЕНТ<sub>*i*</sub>»; при этом  $D_i$  – базовое множество для лингвистической переменной «КОМПОНЕНТ<sub>*i*</sub>», т.е. указывает диапазон изменения оцениваемой величины.

В свою очередь для формализации слабоструктурированной информации о соответствии каждой оценки параметра, имея он числовую или качественную природу, введем лингвистическую переменную «СООТВЕТСТВИЕ». Тогда, по аналогии с вышеизложенной процедурой ввода лингвистической переменной «СООТВЕТСТВИЕ», пусть

$$Z = \{z_k | k = \overline{1, K}\} -$$

множество плохо формализуемых характеристик, отражающих соответствие оцениваемых параметров установленным требованиям. Будем рассматривать каждый такой параметр  $z_k \in Z$  как лингвистическую переменную  $\langle z_k, S_k, H_k \rangle$ . При этом

$$S_k = \{S_{kl} | l = \overline{1, L_k}\} -$$

терм-множество лингвистической переменной «СООТВЕТСТВИЕ<sub>*k*</sub>», способной принимать значения  $S_{kl} \in S_k$ . При этом  $L_k$  указывает на общее число различных значений лингвистической переменной «СООТВЕТСТВИЕ<sub>*k*</sub>». Аналогичным образом  $H_k$  – базовое множество для лингвистической переменной «СООТВЕТСТВИЕ<sub>*k*</sub>», т.е. указывает диапазон изменения соответствия установленным требованиям [1].

Ввиду того, что дальнейшие рассуждения справедливы для лингвистической переменной как понятия, т.е. в равной степени как для лингвистической переменной «КОМПОНЕНТ», так и для лингвистической переменной «СООТВЕТСТВИЕ», то в дальнейших рассуждениях рассмотрим лингвистическую переменную  $\langle \text{«КОМПОНЕНТ»}, T, D, \rangle$  обобщая полученные результаты, если это не противоречит специфике лингвистической переменной  $\langle \text{«СООТВЕТСТВИЕ»}, S, H \rangle$  [2].

Значениями лингвистической переменной  $\langle \text{«КОМПОНЕНТ»}, T, D, \rangle$  являются нечеткие переменные

$$\langle T_j, D, \tilde{C}(T_j) \rangle,$$

где  $T_j$  – название  $j$ -й нечеткой переменной

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$\tilde{C}_j(T_j)$  или упрощенно  $T_j \in T = \{T_j | j = \overline{1, J}\}$ ;  
 $\tilde{C}_j = \left\{ \left\{ \mu_{C_j}(d)/d \right\} (d \in D) \right\}$  –  
 нечеткое подмножество множества  $D$ , описывающее ограничение на возможные значения нечеткой переменной  $T_j$ .

Упорядочим множество  $T = \{T_j | j = \overline{1, J}\}$  в соответствии с правилом:  
 $\forall T_j, T_k \in T (j > k) \Leftrightarrow \exists d_j, d_k \in D (d_j > d_k)$ ,  
 означающим, что терм, который имеет левее расположенный носитель, получает меньший номер. Тогда для лингвистических переменных «КОМПОНЕНТ» и «СООТВЕТСТВИЕ» имеем:

$$\begin{cases} \mu_{C_1}(\inf D) = 1, \\ \mu_{C_j}(\sup D) = 1, \\ \forall T_j \in T \setminus \{T_j\} \quad 0 < \sup \mu_{C_j} \cap C_{j+1}(d) < 1, \\ \forall T_j \in T \quad \exists d \in D \mid \mu_{C_j}(d) = 1, \\ \exists d_1, d_2 \in D \mid \forall d \in D (d_1 < d < d_2). \end{cases}$$

Ключевым моментом в разработке лингвистических переменных «КОМПОНЕНТ» и «СООТВЕТСТВИЕ» является построение их термножеств и определение смысла вошедших в них термов. Одной из важнейших задач, решаемых при разработке лингвистических переменных «КОМПОНЕНТ» и «СООТВЕТСТВИЕ», является задача создания условий для обеспечения требуемой глубины, полноты и достоверности оценки соответствия МЭ заданным требованиям.

Термножество лингвистических переменных «КОМПОНЕНТ» и «СООТВЕТСТВИЕ» должно представлять собой совокупность термов, удовлетворяющих следующему условию [3]

$$\tilde{C}_1 < \tilde{C}_2 < \dots < \tilde{C}_J.$$

Это условие означает, что понятия, используемые экспертом в качестве значений лингви-

стических переменных «КОМПОНЕНТ» и «СООТВЕТСТВИЕ», должны составлять множество, упорядоченное по возрастанию качественных значений признака.

Согласно результатам исследований способностей экспертов к классификации, число термов в термножестве не должно превышать 7-9. Использование большего количества термов влечет за собой значительное возрастание числа ошибок и противоречий.

После определения значений лингвистических переменных, а каждое значение является нечеткой переменной, встает задача определения их семантики, т.е. способа, с помощью которого эксперт может формализовать с лучшим качеством (в максимальном объеме, с максимальной достоверностью и т.п.) свои знания и опыт, в том числе и оценки соответствия средств защиты информации типа МЭ заданным требованиям.

### Литература

1. Тараброва И.Н. Нечеткая модель обоснования перечня показателей качества инновационной деятельности ученого // Транспортное дело России, 2014. №5. С.134-137.
2. Маслов В.Г. Научно-методический аппарат экспертной оценки эффективности научной деятельности высшего военного учебного заведения. Дисс. на соиск. ... канд. тех. наук. М., 2005. 167 с.
3. Данилюк С.Г., Маслов С.В. К вопросу применения нечеткого подхода при диагностировании технического состояния строительных объектов // Известия Института инженерной физики, 2011. №2(20). С.66-69.
4. Данилюк С.Г., Маслов В.Г. Обоснование нечеткого ситуационного подхода к созданию модели системы защиты информации с использованием ложных информационных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2008. №8(85). С.36-41.

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.896

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ГРУППЫ БПЛА НА ЭЙЛЕРО- ГАМИЛЬТОНОВЫХ ГРАФАХ РЕПЕРОВ НА МЕСТНОСТИ

## INTELLIGENT MONITORING OF UAV GROUP ON EYLER-HAMILTON REFERENCE GRAPHS ON THE LOCAL

**Эдуард Михайлович Руденко**  
кандидат технических наук  
доцент кафедры математики  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: +7 (916) 851-80-55  
E-mail: eduard5529@yandex.ru

**Елена Викторовна Семикина**  
преподаватель  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
e-mail: labinfo\_serp@inbox.ru  
Тел.: +7 (916) 726-72-11

### Аннотация

В статье рассматривается применение генетического алгоритма для расчета оптимальных замкнутых маршрутов БПЛА на эйлеро-гамильтоновом графе реперных точек на местности для организации различных схем мониторинга. Математическая модель задачи нахождения маршрутов основана на минимизации неотрицательной целевой функции от целочисленных переменных с помощью генетического алгоритма. Целевая функция строится на основе теорем о единственном представлении математических величин в виде суммы. Компоненты разложения математической величины используются для кодирования ребер или вершин графа в генетическом алгоритме. Аргумент целевой функции представляет собой последовательность номеров вершин графа реперных точек. При достижении минимального нулевого значения целевой функции набор вершин дает оптимальный замкнутый маршрут. Статья отражает взаимосвязь прикладной задачи мониторинга объектов на местности с математической задачей оптимизации на графах средствами генетического алгоритма.

**Ключевые слова:** граф реперных точек, оптимальные замкнутые маршруты на графе, целевая функция, коды ребер и вершин графа, генетический алгоритм.

### Summary

The article discusses the use of a genetic algorithm for calculating the optimal closed UAV routes on the Euler-Hamiltonian graph of reference points on the ground for organizing various monitoring schemes. The mathematical model of the problem of finding routes is based on minimizing a non-negative objective function of integer variables using a genetic algorithm. The objective function is built on the basis of theorems about the unique representation of mathematical quantities as a sum. The expansion components of a mathematical value are used to encode the edges or vertices of a graph in a genetic algorithm. The objective function argument is a sequence of numbers of the vertices of the fiducial point graph. Upon reaching the minimum zero value of the objective function, the set of vertices gives the optimal closed route. The article reflects the relationship of the applied problem of monitoring objects on the ground with the mathematical problem of optimization on graphs by means of a genetic algorithm.

**Keywords:** fiducial point graph, optimal closed routes on a graph, objective function, codes of edges and vertices of a graph, genetic algorithm.

### Постановка математической задачи

Математическая постановка задачи нахождения множества оптимальных замкнутых маршрутов (ОЗМ)  $M = \{m\}$  на графе  $G = (V, E)$ , где  $V = \{v\}$  – множество вершин,  $E = \{e\}$  – множество ребер, имеет вид

$$M = \operatorname{argmin} d(m) \\ m = (e_1, e_2, \dots, e_k), M = \{m\} \quad (1) \\ E \subseteq \{e_1, e_2, \dots, e_k\}, e_1 = (v_1, v_2), \dots, e_k = (v_k, v_{k+1}), v_1 = v_{k+1}$$

$$\{e_1, e_2, \dots, e_k\} \setminus E \cap \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{is}\} = \emptyset.$$

Здесь  $M$  – множество замкнутых маршрутов на графе, так как выполняется условие  $v_1 = v_{k+1}$ , и  $m = (e_1, e_2, \dots, e_k)$  минимизирует число ребер  $d(m)$  [1].

Маршрут является эйлеровым, если в наборе  $m = (e_1, e_2, \dots, e_k)$  содержатся все ребра графа  $G$  и выполняется условие  $E \subseteq \{e_1, e_2, \dots, e_k\} = m$ . Длина равна числу ребер, входящих в него:  $d(m) = k$ . Для эйлерова графа – это число одинаково для всех

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ОЗМ и подсчитывается по формуле:

$$d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho(v_i), \quad (2)$$

где  $\rho(v_i)$  – кратность вершины, то есть число инцидентных  $v_i$  ребер [2].

Множество ребер  $\{e_1, e_2, \dots, e_k\} \setminus E$  состоит из разности между всеми ребрами графа и ребрами  $m = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ , образующими замкнутый маршрут. Не пустое множество состоит только из кратных ребер графа. Условие

$$\{e_1, e_2, \dots, e_k\} \setminus E \cap \{e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_s}\} = \emptyset$$

означает, что граф  $G$  (рисунк 1а) должен быть дополнен до эйлерова графа  $vbe11$  (рисунк 1б) такими кратными ребрами, которые не содержатся среди множества ребер  $\{e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_s}\}$ . Для графа  $vbe11$  множество  $\{e_1, e_2, \dots, e_k\} \setminus E$  равно одному ребру  $\{(1,3)\}$ , а множество  $\{e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_s}\}$  может состоять из ребер  $\{e_{i_1} = (1,5), e_{i_2} = (3,5), e_{i_3} = (2,4)\}$ .

Оптимизационная задача (1) относится к задачам на условный экстремум. Поиск ОЗМ состоит в нахождении замкнутой последовательности ребер  $m = (e_1, e_2, \dots, e_k)$ , содержащей все ребра графа и имеющей минимальную длину. Она имеет множество решений, что нетрудно проверить на примере графа  $vbe11$ , найдя на рисунке 1б несколько маршрутов, имеющих длину, равную 11 ребрам.

Рассматриваемая задача (1) относится к разделу целочисленного программирования. Для ее решения может быть применен генетический алгоритм (ГА) [3].

Функция  $d(m)$  на графе  $vbe11$  достигает значения равного 11, например, на замкнутом маршруте вида

$$(1, 2, 4, 3, 1, 7, 3, 1, 7, 1, 7, 1),$$

который не удовлетворяет условию из (1), а именно прохождению по всем ребрам. Для преобразования этой задачи в безусловный экстремум необходимо построить целевую функцию  $Z(m)$ , которая будет достигать минимум только на множестве ОЗМ графа

$$\text{ОЗМ} = \text{argmin } Z(m),$$

$m = (1, x_1, x_2, \dots, x_{10}, 1) \in 1 \times \{1, 2, \dots, 6\}^{10} \times 1$  где  $\{1, 2, \dots, 6\}^{10}$  – декартово произведение множества чисел  $\{1, 2, \dots, 6\}$ . Отметим, что здесь неизвестными целыми положительными значениями являются номера вершин  $x_1, x_2, \dots, x_{10}$  из множества  $\{1, 2, \dots, 6\}$ .

### Алгоритм построения целевой функции на эйлеровых графах

Алгоритм построения целевой функции (ЦФ) рассмотрим на примере графа  $vbe11$ , для которого имеем  $Z(m) = Z(1, x_1, x_2, \dots, x_{10}, 1)$ . Расчет ОЗМ генетическим алгоритмом основан на наборе маршрута из исходного ребра  $(1, x_1)$  до конечного  $(x_{10}, 1)$  с помощью цикла по числу ребер  $(x_i, x_{i+1})$ , где  $i = 1, \dots, 11$ . Хромосомами ГА в этом случае являются наборы  $(x_1, x_2, \dots, x_{10})$  из номеров вершин графа  $vbe11$ :  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .

Фиксация начальной и конечной точки для ОЗМ (в данном случае вершины с номером 1) позволяет уменьшить число неизвестных в наборах  $(1, x_1, x_2, \dots, x_{10}, 1)$  на две переменные и позволяет ускорить работу ГА, а также устраняет неопределенность в построении ОЗМ.

В процессе работы генетический алгоритм генерирует наборы, каждая пара вершин  $(x_i, x_{i+1})$  в которых может оказаться как реальным ребром, принадлежащим рассматриваемому графу, так и ложным ребром или петлей  $(x_i, x_i)$ , которые не входят в состав  $E \subseteq \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$ . Поэтому необходимо разделить все элементы на два непересекающихся множества, используя принцип штрафования ложных ребер и петель, например, с помощью матрицы смежности или разделяющей функции [4].

В качестве такой функции для графа  $vbe11$  можно взять симметричную функцию

$$f(x, y) = 6xy - 2(x^2 + y^2) + x + y + 15. \quad (3)$$

На реальных ребрах функция (3) принимает значения

$$f(A) = S = \{20, 17, -1, 29, 24, 15, 44, 45, 62, 65\},$$

на ложных ребрах и петлях

$$f(B) = P = \{10, -16, 30, 42, 84, 19, 27, 39, 55, 75, 99\},$$

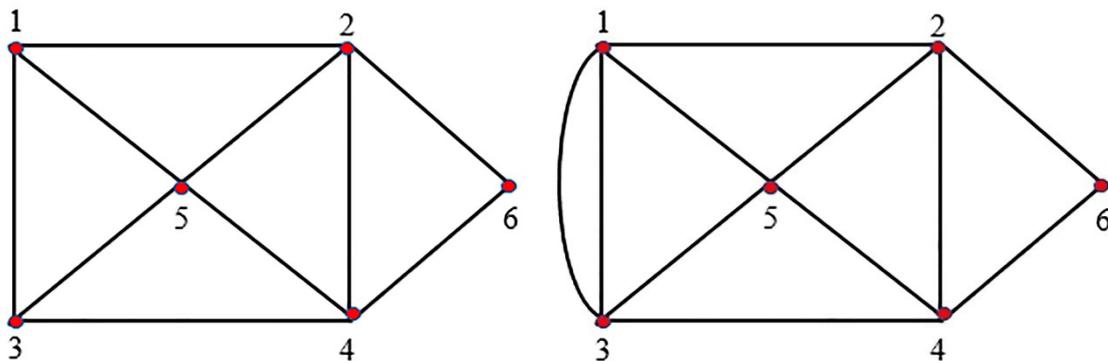


Рис. 1. Граф: а)  $vbe10$ , б) эйлеров  $vbe11$

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

так что эти множества разделены:

$$f(A) \cap f(B) = S \cap P = \emptyset$$

Для построения целевой функции графа  $vbe11$  присвоим каждому реальному ребру код [5], то есть уникальное значение из некоторого математического (алгебраического) множества с операцией сложения. Коды представляют собой величины однозначного разложения некоторой математической величины в сумму.

Для множества целых чисел  $Z$  с операцией сложения такими кодами могут быть слагаемые величин  $s$ -ического разложения числа:

$$z = a_0 s^0 + a_1 s^1 + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n, \quad (4)$$

где  $s^i$  – коды ребер;

$a_i$  – кратность ребра.

Так как в графе есть ребро кратности два, то  $s > 2$ .

Коды присваиваются с помощью функции  $g(m_i, m_{i+1})$ , которая реальным ребрам графа  $(m_i, m_{i+1})$  ставит величины  $s^i$ :

$$V_k : \exists_1 \frac{(V_k + \Delta C_k)}{V_k} 100\%, \quad (5)$$

Всем ложным ребрам и петлям ставится в соответствие одна и та же большая степень-штраф, например,  $s^{12}$ .

Целевая функция в аддитивном представлении:

$$Z_1(m) = \left( \sum_{i=1}^n g(m_i, m_{i+1}) - \sum_{i=0}^{n-1} a_i s^i \right)^2 \geq 0. \quad (6)$$

Задача минимизации ЦФ (6) в отличие от задачи (1) относится к безусловной оптимизации и упрощает применение ГА.

ЦФ (6) является неотрицательной, так как ГА реализует минимизацию функции, и наборы, которые являются ОЗМ, обращают ее в нуль. Это является удобным признаком сходимости ГА к ОЗМ.

### Алгоритм построения целевой функции на гамильтоновых графах

На гамильтоновых графах существуют замкнутые маршруты, которые проходят один раз через все вершины. Задача нахождения таких маршрутов на графе  $G=(V,E)$ , где  $V=\{v\}$  – множество вершин,  $E=\{e\}$  – множество ребер, может быть сформулирована в виде оптимизационной задачи (7):

$$M = \operatorname{argmin} d(n)$$

$$M = \{n\}, n = (e_1, e_2, \dots, e_k), e_1 = (v_1, v_2), \dots, e_k = (v_k, v_{k+1}), v_1 = v_{k+1}, \{e_1, e_2, \dots, e_k\} \subseteq E, \{v_1, v_2, \dots, v_k\} = V. \quad (7)$$

Здесь  $M$  – множество оптимальных замкнутых гамильтоновых маршрутов на графе, так как выполняется условие  $v_1 = v_{k+1}$ , и  $n = (e_1, e_2, \dots, e_k)$ , содержит минимальное число ребер.

Ребра маршрута  $n = (e_1, e_2, \dots, e_k)$  содержатся во множестве  $G$ , так как выполняется условие  $\{e_1, e_2, \dots, e_k\} \subseteq E$ . Длина маршрута  $n$  обозначается

$d(n)$  и равна числу вершин графа:  $e_1 = (v_1, v_2), \dots, e_k = (v_k, v_{k+1}), \{v_1, v_2, \dots, v_k\} = V$ . Для гамильтоновых графов это число одинаково для всех ОЗМ [2]. Граф на рисунке 1 является гамильтоновым, так как на нем существует гамильтонов маршрут

$$n = (1, 2, 6, 4, 5, 3, 1).$$

ЦФ гамильтонова графа состоит из двух уравнений (8):

$$Z_E(n) = \sum_{i=1}^{\#V} \operatorname{addweight}_E(v_i, v_{i+1}) - A_E = 0; \quad (8)$$

$$Z_V(n) = \sum_{i=1}^{\#V} \operatorname{cod}_V(v_i) - A_V = 0$$

при тривиальных весах ребер  $\operatorname{addweight}_E(v_i, v_{i+1}) = 1$ ,  $A_E = \#V$  и уникальных кодах  $\operatorname{cod}_V(v_i)$  вершин, удовлетворяющих условиям однозначного разложения в сумму математической величины  $A_V$  [1].

### Расчет эйлеровых ОЗМ на графе $vbe11$

При настройках ГА: 'Generations', 15, 'PopulationSize', 38, 'StallGenLimit', 30' и изменении фактора кроссовера в цикле от  $n1=0,1$  до  $n2=0,7$  с шагом  $nn=0,1$  получено за время 5,8 секунд пять ОЗМ (таблица 1).

Все полученные ОЗМ проходят по всем ребрам графа  $vbe11$  один раз и обнуляют ЦФ (7)  $s=3$ .

Используя целевые функции (7) или (8), можно методом перебора во вложенных циклах по количеству вершин  $x_1, x_2, \dots, x_{10}$  на графе  $vbe11$ , изменяя значения переменных из множества  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  в наборах  $(1, x_1, x_2, \dots, x_{10}, 1)$  найти на двухдерном компьютере с частотой 1,5 ГГц за 28,4 минут все 240 эйлеровых замкнутых маршрутов [4].

Анализ эйлеровых маршрутов в таблице 1 показывает, что многие из них начинаются и заканчиваются гамильтоновыми маршрутами. Например, маршруты  $m_2$  и  $m_3$  начинаются с гамильтоновых маршрутов.

**Таблица 1**  
Оптимальные замкнутые маршруты на эйлеровом графе  $vbe11$

№	Фактор кроссовера	ОЗМ
1	0,1	$m_1 = (1, 5, 3, 1, 2, 6, 4, 2, 5, 4, 3, 1)$
2	0,2	$m_2 = (1, 3, 4, 6, 2, 5, 1, 3, 5, 4, 2, 1)$
3	0,3	$m_3 = (1, 3, 5, 4, 6, 2, 1, 5, 2, 4, 3, 1)$
4	0,4	$m_4 = (1, 5, 3, 1, 2, 6, 4, 5, 2, 4, 3, 1)$
5	0,5	$m_5 = (1, 3, 5, 2, 4, 3, 1, 5, 4, 6, 2, 1)$
6	0,6	$m_6 = (1, 3, 1, 2, 5, 4, 6, 2, 4, 3, 5, 1)$
7	0,7	$m_7 = (1, 3, 4, 5, 2, 4, 6, 2, 1, 3, 5, 1)$

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## Расчет гамильтоновых ОЗМ на графе $v_{6e10}$

С помощью ЦФ (8) можно подсчитать ГА все гамильтоновы ОЗМ при настройках: 'Generations', 40, 'PopulationSize', 75, 'StallGenLimit', 90 в цикле от  $n1=0,1$  до  $n2=0,6$  с шагом  $nn=0,1$  на двухъядерном компьютере с частотой 3,4 ГГц за 38 секунд, которые приведены в *таблице 2*.

Гамильтоновы маршруты из *таблицы 2* представлены на *рисунке 2*.

Так как все маршруты в *таблице 2* замкнутые, начинаются и заканчиваются в вершине с номером 1, она считается в наборах один раз. Маршрут можно начинать с любой вершины. Для получения маршрута с концевыми точками 6 необходимо «разрезать» его в месте, где расположена вершина 6 и полученные части соединить в конечных точках с номером 1:

$$(1\ 2\ 6\ 4\ 3\ 5\ 1) \rightarrow (1\ 2\ 6)(6\ 4\ 3\ 5\ 1) \rightarrow (6\ 4\ 3\ 5\ 1)(1\ 2\ 6) \rightarrow (6\ 4\ 3\ 5\ 1\ 2\ 6). \quad (9)$$

Разнообразие маршрутов позволяет выбирать их, в зависимости от меняющейся обстановки, программными средствами на борту БПЛА.

## Организация мониторинга с помощью ОЗМ

При выполнении мониторинга крайне важно оперативное получение данных о наблюдаемой обстановке за пределами границы объекта, на его периметре, а также внутри объекта. Это

достигается применением группировки из нескольких БПЛА.

При следовании БПЛА в группе основным требованием является выполнение безопасных условий полета, что обеспечивается:

- а) полетом в любой момент времени по разным ребрам графа;
- б) отсутствием в одинаковых вершинах двух и более аппаратов одновременно.

Этого можно достичь при равенстве времени полета БПЛА на каждом ребре. При этом на ребрах большей протяженности они должны двигаться быстрее, а на коротких – медленнее. Предполагается, что все БПЛА достигнут разных вершин графа в ходе следования по маршруту приблизительно в один и тот же момент времени.

## Мониторинг по гамильтоновым маршрутам

Из *таблицы 2* следует, что гамильтоновых маршрутов намного меньше, чем эйлеровых, но каждый из них обеспечивает организацию патрулирования с помощью максимального количества БПЛА, одновременно следующих друг за другом с интервалом одно ребро. Число аппаратов при этом равно количеству вершин графа (*таблица 3*).

Разделитель «|» показывает, где «сшиваются» одинаковые маршруты. Маршрут №5 из *таблицы 2* проходит по ребрам (1,2), (2,6), (6,4), (4,3), (3,5), (5,1), но не проходит по (1,3), (2,4), (2,5) и (4,5). Приведенный в *таблице 3* плотный непрерывный мониторинг из шести БПЛА можно ослабить, сделав патрулирование из меньшего количества летательных аппаратов, если исключить строки этих ЛА из *таблицы 3*.

**Таблица 2**

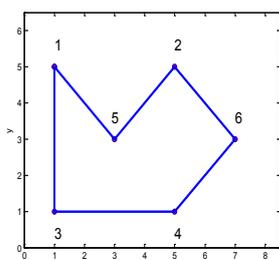
Гамильтоновы маршруты на графе  $v_{6e10}$

№	Фактора кроссовера $n1$	Маршруты
1	0,1	$m_1 = (1\ 5\ 2\ 6\ 4\ 3\ 1)$
2	0,2	$m_2 = (1\ 5\ 3\ 4\ 6\ 2\ 1)$
3	0,3	$m_3 = (1\ 3\ 4\ 6\ 2\ 5\ 1)$
4	0,4	$m_4 = (1\ 3\ 5\ 4\ 6\ 2\ 1)$
5	0,5	$m_5 = (1\ 2\ 6\ 4\ 3\ 5\ 1)$
6	0,6	$m_6 = (1\ 2\ 6\ 4\ 5\ 3\ 1)$

**Таблица 3**

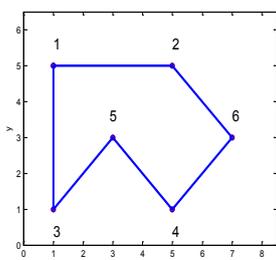
Патрулирование шести БПЛА по гамильтонову маршруту  $m_5$

Номер столбца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1-й БПЛА	1	2	6	4	3	5	1	2	6	4	3	5
2-й БПЛА		1	2	6	4	3	5	1	2	6	4	3
3-й БПЛА			1	2	6	4	3	5	1	2	6	4
4-й БПЛА				1	2	6	4	3	5	1	2	6
5-й БПЛА					1	2	6	4	3	5	1	2
6-й БПЛА						1	2	6	4	3	5	1



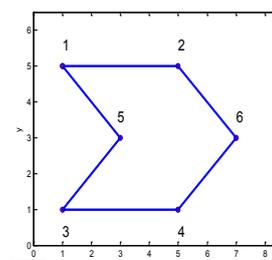
$$m_1 = (1\ 5\ 2\ 6\ 4\ 3\ 1)$$

$$m_3 = (1\ 3\ 4\ 6\ 2\ 5\ 1)$$



$$m_2 = (1\ 2\ 6\ 4\ 5\ 3\ 1)$$

$$m_4 = (1\ 3\ 5\ 4\ 6\ 2\ 1)$$



$$m_5 = (1\ 2\ 6\ 4\ 3\ 5\ 1)$$

$$m_6 = (1\ 5\ 3\ 4\ 6\ 2\ 1)$$

**Рис. 2.** Гамильтоновы маршруты на графе  $v_{6e11}$  из *таблицы 2*

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Единственный автоморфизм горизонтальной симметрии (10) графа  $vbe10$  переставляет гамильтоновы маршруты из *таблицы 2*:

$$\gamma_z = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 3 & 4 & 1 & 2 & 5 & 6 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \gamma_z(m_1) &= m_4; \gamma_z(m_2) = m_3; \gamma_z(m_3) = m_2; \gamma_z(m_4) = m_1; \\ \gamma_z(m_5) &= m_6; \gamma_z(m_6) = m_5. \end{aligned} \quad (11)$$

Перестановка в (11) маршрутов с помощью автоморфизма (10) позволяет чередовать маршруты парами:  $m_5$  и  $m_6$ ;  $m_2$  и  $m_3$ ;  $m_4$  и  $m_1$ .

Используя автоморфизм (10), можно в *таблице 3* перейти от гамильтонова маршрута  $m_5$  к другому маршруту  $m_6$  (*таблица 4*).

Для организации мониторинга меньшим числом БПЛА достаточно в *таблице 5* удалить некоторые строки.

### Организация мониторинга по эйлеровым маршрутам

Методом перебора можно установить, что на графе  $vbe11$  максимальное число БПЛА для группового полета с интервалом в одно ребро по

эйлеровым маршрутам равно четырем. Это показано в *таблице 5* на примере маршрута  $m_5 = (1, 3, 5, 2, 4, 3, 1, 5, 4, 6, 2, 1)$  из *таблицы 1*.

В столбце 12 первый ЛА переходит на полет по своему же маршруту. Аналогично и остальные ЛА переходят в полете на повторение своего же маршрута в столбцах 13, 14 и в столбце 15.

Отметим, что, когда БПЛА находятся в вершинах какого-нибудь столбца, можно, применяя к маршруту  $m_5$  автоморфизм графа  $vbe11$  (10), получить переход полета группы на новый маршрут (*таблица 6*):

$$\gamma_z(m_5) = (1\ 5\ 4\ 2\ 1\ 3\ 5\ 2\ 6\ 4\ 3\ 1).$$

### Организация мониторинга по эйлеровым и гамильтоновым ОЗМ

Рассмотрим организацию перехода с гамильтонова маршрута на эйлеров, который представлен в *таблице 7*.

Как следует из *таблицы 7* переход осуществлен в том выделенном столбце, где значения номеров вершин совпадают с последовательным

**Таблица 4**  
Полет БПЛА при переходе с маршрута  $m_5$  на  $m_6$  в столбце № 8

Номер столбца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1-й ЛА	1	2	6	4	3	5	1	2	1	5	3	4	6	2	1
2-й ЛА		1	2	6	4	3	5	1	5	3	4	6	2	1	5
3-й ЛА			1	2	6	4	3	5	3	4	6	2	1	5	3
4-й ЛА				1	2	6	4	3	4	6	2	1	5	3	4
5-й ЛА					1	2	6	4	6	2	1	5	3	4	6
6-й ЛА						1	2	6	2	1	5	3	4	6	2

**Таблица 5**  
Полет БПЛА по эйлерову маршруту  $m_5$

Номер столбца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1-й ЛА	1	3	5	2	4	3	1	5	4	6	2	1	3	5	2	4	3
2-й ЛА		1	3	5	2	4	3	1	5	4	6	2	1	3	5	2	4
3-й ЛА			1	3	5	2	4	3	1	5	4	6	2	1	3	5	2
4-й ЛА				1	3	5	2	4	3	1	5	4	6	2	1	3	5

**Таблица 6**  
Полет БПЛА с переходом в столбце 9 с маршрута  $m_5$  на  $\gamma_z(m_5)$

Номер столбца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1-й ЛА	1	3	5	2	4	3	1	5	4	6	2	1	3	5	2	4	3
2-й ЛА		1	3	5	2	4	3	1	5	4	6	2	1	3	5	2	4
3-й ЛА			1	3	5	2	4	3	1	5	4	6	2	1	3	5	2
4-й ЛА				1	3	5	2	4	3	1	5	4	6	2	1	3	5

**Таблица 7**  
Переход в столбце 6 с гамильтонова маршрута  $m_4 = (1\ 3\ 5\ 4\ 6\ 2\ 1)$  на эйлеров маршрут  $m_5 = (1\ 3\ 5\ 2\ 4\ 3\ 1\ 5\ 4\ 6\ 2\ 1)$

Номер столбца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1-й ЛА	1	3	5	4	6	2	1	3	5	2	4	3	1	5	4	6	2
2-й ЛА		1	3	5	4	6	2	1	3	5	2	4	3	1	5	4	6
3-й ЛА			1	3	5	4	6	2	1	3	5	2	4	3	1	5	4
4-й ЛА				1	3	5	4	6	2	1	3	5	2	4	3	1	5

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

порядком вершин в гамильтоновом и эйлеровом маршрутах:

$$m_4 = (1\ 3\ 5\ 4\ 6\ 2\ 1),$$

$$m_5 = (1\ 3\ 5\ 2\ 4\ 3\ 1\ 5\ 4\ 6\ 2\ 1).$$

В таблице 8 приведен двойной переход с гамильтонова на эйлеров маршрут и обратный с эйлерова на гамильтонов маршрут.

Первый переход с гамильтонова маршрута  $m_1$  на эйлеров  $m$  происходит в пятом столбце. Обратный переход с эйлерова маршрута на гамильтонов происходит в 16 столбце. Так как в этих столбцах последовательность номеров вершин совпадает с последовательностью номеров этих же вершин в обоих маршрутах  $m_1$  и  $m$ , то задержки в вершинах при полете всей группы не происходит ни для одного ЛА.

### Выводы

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- генетический алгоритм и целевые функции графов реперных точек на местности позволяют решать задачи маршрутизации по эйлеро-гамильтоновым графам в различных порядках группового полета;

- целевая функция  $Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$  имеет простой программный код и является неотрицательной функцией от нескольких переменных. Минимизация неотрицательной целевой функции ГА до нуля гарантирует получение ОЗМ;

- ограниченное число ОЗМ, полученное ГА, может быть увеличено в несколько раз за счет преобразований  $\gamma_{\text{обф}}$ ,  $\gamma_{\text{раз}}$  и применения автоморфизмов графа  $\{\gamma_{\text{авт}}\}$ ;

- генетический алгоритм позволяет за корот-

кое время получить ограниченное множество маршрутов, которых для планирования группового полета может оказаться достаточно;

- алгоритм построения ЦФ и ГА могут быть использованы в бортовых алгоритмах БПЛА планирования маршрутов на графах реперных точек в реальном масштабе времени;

- приведенные в таблицах варианты мониторинга позволяют сочетать различные схемы на эйлеро-гамильтоновых графах.

Проведенный анализ различных схем полета показывает перспективность организации интеллектуальной системы мониторинга по эйлеро-гамильтоновым графам на основе генетического алгоритма.

### Литература

1. Дараган А.Д. Системы искусственного интеллекта. Монография / А.Д. Дараган, Э.М. Руденко, В.С. Залогин, А.А. Ефремов, А.С. Андреев, М.А. Финогенов, В.В. Чуринов. Серпухов: ФВА РВСН им. Петра Великого, 2020. 205 с.
2. Омельченко А.В. Теория графов. М.: МЦНМО, 2018. 416 с.
3. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика: Учеб. пособие. СПб.: ГУап, 2008. 164 с.
4. Руденко Э.М., Семикина Е.В. Маршрутизация беспилотных летательных аппаратов, трансцендентные целевые функции графа и генетический алгоритм // Научные исследования в космических исследованиях Земли, 2021. Т.13. №1. С.4-14.
5. Herrera F. Tackling real-coded genetic algorithms: operators and tools for the behaviour analysis / F. Herrera, M. Lozano, J.L. Verdegay // Artificial Intelligence Review, 1998. V.12. №4.

**Таблица 8**

Двойной переход с гамильтонова маршрута  $m_1=(1\ 5\ 2\ 6\ 4\ 3\ 1)$   
на эйлеров маршрут  $m=(1\ 3\ 1\ 5\ 4\ 6\ 2\ 5\ 3\ 4\ 2\ 1)$  и обратно

Номер столбца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1-й ЛА	1	5	2	6	4	6	2	5	3	4	2	1	3	1	5	4	3	1	5
2-й ЛА		1	5	2	6	2	5	3	4	2	1	3	1	5	4	6	4	3	1
3-й ЛА			1	5	2	5	3	4	2	1	3	1	5	4	6	2	6	4	3
4-й ЛА				1	5	3	4	2	1	3	1	5	4	6	2	5	2	6	4

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.042; 004.62

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ  
ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ  
БОЛЬШИХ ДАННЫХ В  
БУХГАЛТЕРСКОМ УЧЕТЕ**

**USING THE METHODS  
OF CLUSTERING PHASE  
PORTRAITS IN THE  
PROCESSING OF BIG DATA IN  
ACCOUNTING**

**Олег Игоревич Атакищев**

*доктор технических наук, профессор  
заместитель генерального директора  
по специальным проектам  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: aoi007@mail.ru*

**Константин Юрьевич Рюшин**

*доктор технических наук  
ведущий научный сотрудник  
ФГБОУ ВО «МТУСИ»  
Адрес: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а  
Тел.: +7 (495) 957-77-31  
E-mail: e8@mail.ru*

**Андрей Алексеевич Амелёнков**

*кандидат экономических наук, доцент  
начальник исследовательской части  
ФГБОУ ВО «МГЛУ»  
Адрес: 119034, Москва, ул. Остоженка, д. 38,  
стр. 1  
E-mail: amelioncov@linguanet.ru*

## Аннотация

Рассмотрена задача построения траекторий развития подсистем, формирующих макросистему. Построение траектории развития в виде фазового портрета, включающего не только значения показателей, но и значения их первых и вторых производных, позволяет формировать кластеры наиболее близких траекторий. Для этого введена обобщенная метрика, учитывающая корреляционные матрицы показателей подсистемы как временных рядов.

**Ключевые слова:** прогнозирование, макросистемы, управленческий учет, динамика развития подсистем, метрика Евклида-Махаланобиса.

## Summary

The problem of constructing trajectories of development of subsystems forming a macrosystem is considered. Building a development trajectory in the form of a phase portrait, which includes not only the values of indicators, but also the values of their first and second derivatives, makes it possible to form clusters of the closest trajectories. For this, a generalized metric has been introduced that takes into account the correlation matrices of the indicators of the subsystem as time series.

**Keywords:** forecasting, macrosystems, management accounting, dynamics of development of subsystems, Euclidean-Mahalanobis metric.

## Введение

Задачи обработки больших данных бухгалтерского финансового и бухгалтерского управленческого учета с целью прогнозирования состояния предприятия, в том числе его финансовой устойчивости, не могут быть надежно решены путем вычисления индексов или векторов индексов, прежде всего потому, что индексы дают информацию о статике, тогда как для прогноза необходимо учитывать динамику развития предприятия. Необходимо обрабатывать не только текущее состояние предприятия, но и изменение, а, в ряде случаев, и скорости изменения параметров предприятия. Отсутствие универсального метода прогнозирования,

использование интуитивных методов экспертных оценок [1] характерно для ситуации, когда большое количество данных не может быть полноценно обработано. При этом известно, что увеличение эмпирических данных способствует повышению точности и (или) надежности прогноза [2]. Статистические методы прогнозирования, как правило, предполагают построение линии регрессии как зависимости математического ожидания параметров предприятия во времени и ее экстраполяцию для определения наиболее вероятного значения вектора параметров состояния предприятия  $x(T)$  в точке прогноза  $T$ . В этом случае требуется прежде всего доказать нормальность закона распределения  $x(t)$  в

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

каждой точке  $t$  или доказать корректность вычисления линии регрессии при ином типе распределения [3,4]. Применение регрессионных моделей и факторного анализа позволяет при сравнительно небольших вычислительных мощностях оценить финансовое состояние предприятия, однако в каждом конкретном случае выделение факторных признаков и выбор вида регрессионной линии проводятся методом экспертных оценок (например, по обучающей выборке).

Само наличие большого выбора методов расчета и показателей финансовой устойчивости предприятия означает, что результат прогноза существенно зависит от особенностей рынков, на которых функционирует предприятие, неучтенных параметров предприятия и других условий. Задача – найти метод, позволяющий для любого предприятия или группы предприятий (отрасли) сформировать прогноз финансового состояния, обеспечить возможность сравнения и оценки путей развития различных предприятий одной отрасли, что даст дополнительную информацию для регулирования рынка.

### Представление больших объемов данных

Данные массива учета необходимы для проведения анализа деятельности предприятия, который выполняет важнейшую роль в разработке инновационной стратегии, ее адаптации к специфике компании и условий реализации. Как разработка стратегии компании, так и ее реализация требуют сбора и обработки большого количества данных. В настоящее время формирование информационной системы стратегического учета деятельности предприятия является необходимой частью ИТ-обеспечения компании [5].

В условиях развития информационного общества решение задач стратегического управления становится основой конкурентной политики предприятия. Стратегическое управление, поддержанное обоснованным расчетом, позволяет не только выбрать направления развития деятельности предприятия, направления освоения рынков, методов обслуживания потребностей и привлечения ресурсов, но и найти принципиально новые решения, обеспечивающие жизнеспособность компании в средне- и долгосрочном периодах. Совокупность таких решений формирует бизнес-модель компании.

Если стратегия предприятия определяет методы создания и поддержки конкурентных преимуществ ведения бизнеса, не касаясь конкретных финансовых результатов, то бизнес-модель позволяет провести анализ показателей прибыли и издержек в различных внешних условиях развития [6].

Наличие у компании адекватной бизнес-модели подтверждается стабильностью получения прибыли в течении длительного срока работы, что означает, в том числе, учет изменений конкурентной среды, условий ведения бизнеса, долгосрочных последствий кадровой политики, определяемой управленческими решениями на уровне предприятия и стратегией развития человеческого капитала на уровне региона и страны в целом, технологического уровня и пр. При этом отмечаем, что задача поддержания стабильной прибыли на удовлетворительном уровне существенно отличается от задачи максимизации прибыли в краткосрочном периоде [7] и требует значительно большего массива данных как о состоянии производства и управленческих решениях, так и о внешних условиях и воздействиях.

Таким образом, формирование комплекса «стратегия – бизнес-модель» требует анализа большого количества (и потока большой интенсивности) данных, включая данные о прошлом и настоящем (и обоснованный прогноз о будущем) состояния предприятия, а также данных о прошлом и настоящем (и обоснованный прогноз о будущем) состояний конкурентной среды, в которой предприятие осуществляет свою деятельность [7]. При этом должны выполняться следующие взаимодополняющие условия:

- принцип Маркова: прошлые состояния влияют на последующие в течение только определенного периода. Накопленный опыт теряет свою ценность и не может быть использован неограниченно долго;
- принцип Беллмана: отправной точкой стратегического развития является текущее состояние компании вне зависимости от причин, результатом которых и является это текущее состояние;
- принцип Бергаланфи: развитие предприятия как открытой системы происходит под влиянием как внутренних, так и внешних закономерностей и стохастических воздействий. Это означает, что бизнес-анализ состояния предприятия должен включать ревизию всех ресурсов, сильных и слабых сторон самой компании, с одной стороны, и исследование и прогноз развития, определение возможностей и угроз внешней среды – с другой.

Комплекс «стратегия – бизнес-модель» в его информативной реализации формирует поддерживающую учетно-информационную систему обработки больших данных. Учетно-информационная система предназначена для решения задач:

- организация стратегического управленческого учета инновационной деятельности предприятия;
- проведение маркетингового анализа плани-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

руемой деятельности предприятия;

- обоснование управленческих решений, рассматриваемых руководством предприятия;
- прогнозирование и анализ последствий управленческих, технологических и инновационных решений;
- оптимизация деятельности предприятия в изменяющихся внешних условиях;
- структуризация и оценка рыночной конъюнктуры, а также иных внешних возможностей и угроз с учетом их динамики.

Для решения этих задач требуется сформулировать методы и методики анализа и оценки стратегических управленческих инициатив, а также стратегических управленческих решений в условиях определенности, неопределенности и риска, что особенно важно для инновационной деятельности. Одним из таких методов является кластерный анализ данных, позволяющий агрегировать субъекты экономических процессов, в которые вовлечено предприятие, по результатам их деятельности, не прибегая к операциям усреднения.

### Задачи кластерного анализа

Для анализа динамических рядов, полученных в базе бухгалтерских данных предприятия (группы предприятий, отрасли), можно использовать кластерный анализ. Суть его в том, что в качестве исходных данных используются все получаемые значения без предварительной обработки – нормирования, агрегирования и пр. Получаемый многомерный динамический ряд аппроксимируется гладкой кривой  $x(t)$  в  $N$ -мерном метрическом пространстве. Такая аппроксимация корректна при длительном периоде исследования [8]. Кривая  $x(t)$  называется траекторией развития предприятия. Для любых двух кривых  $x_1(t), x_2(t)$  в  $N$ -мерном метрическом пространстве можно рассчитать расстояние  $d(x_1, x_2)$  и усредненную кривую  $y(t, x_1, x_2)$  такую, что сумма расстояний от этой усредненной кривой до каждой из исходных траекторий минимально.

Такая усредненная кривая  $y(t, X)$  может быть построена для любого множества траекторий

$$X = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}:$$
$$\sum_{i=1}^m d(y, x_i) \rightarrow \min_{y(t, X)} \quad (1)$$

Кластером траекторий называется множество траекторий  $X$ , для которых максимальное расстояние  $d_{\max}$  от усредненной траектории не превышает заданного значения  $d_0$ :

$$d_{\max} = \max \{d(y, x_i) | \forall i \in X\} \leq d_0. \quad (2)$$

Построенные кластеры объединяют предприятия, сходные по своему положению на рынках, что обеспечивается большим значением  $N$  и

условиями корреляции между показателями [9]. Задача прогнозирования в этом случае аналогична задаче распознавания образов: определенные расстояния от траектории  $x(t)$  до кластера  $X$  [10,11]. При существовании нескольких кластеров  $X_j \in Y$  ( $j=1, \dots, M$ ) необходимо определить минимальное расстояние  $d(y, x)$  при ограничении на допустимое отклонение в кластерах:

$$\min \{d(y_j, x) | \forall j \in Y\} \leq d_0. \quad (3)$$

При этом величина  $d_0$  может быть определена из решения двухкритериальной задачи  $\{M \rightarrow \min; d_0 \rightarrow \min\}$ .

### Выбор метрики

При выборе метрики, определяющей расстояние между траекториями  $x_1(t), x_2(t)$  необходимо учитывать не только расположение средних точек траекторий  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ , но и корреляционные зависимости между параметрами траекторий. Исходя из этого, в качестве метрики удобно воспользоваться обобщенной метрикой Евклида-Махаланобиса [10]:

$$d_G = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^T A^{-1} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2), \quad (4)$$

где матрица  $A$  является некоторой функцией  $A = \Phi(C_1, C_2)$  корреляционных матриц параметров траекторий  $C_1, C_2$ , такой чтобы:

- матрица  $A$  должна быть симметрической и положительно определенной;
- если параметры траекторий не коррелированы друг с другом, что может быть связано как с независимостью параметров, так и с особенностями траекторий, т.е. если  $C_1 = C_2 = 0$ , то матрица  $A$  должна быть равна единичной матрице  $E$ , что соответствует Евклидовому расстоянию между траекториями.

Отметим, что элементами корреляционных матриц являются ковариационные моменты, связывающие параметры предприятий. Корреляционные моменты характеризуют не только степень зависимости между переменными, но и величину наклона регрессионной линии. Таким образом, при использовании функции корреляционных матриц  $\Phi(C_1, C_2)$  для определения расстояния между траекториями, можно учесть направление траекторий, и при совпадении направлений при прочих равных условиях расстояние будет минимальным, а в случае, когда направления траекторий перпендикулярны – максимальным. Для этого необходимо, чтобы абсолютные значения элементов матрицы  $A$  монотонно зависели от разности соответствующих элементов матриц  $C_1$  и  $C_2$ . Такой функцией может быть

$$\Phi(C_1, C_2) = |C_1 - C_2| + E. \quad (5)$$

В этом случае условия, накладываемые на функцию  $\Phi(C_1, C_2)$  выполняются, что означает, что при использовании матрицы  $A = \Phi(C_1, C_2)$  в (4) величина

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$d_G$  удовлетворяет всем метрическим свойствам.

Параметры развития предприятия имеют размерности, причем хотя размерности элементов вектора  $x(t)$  могут быть различны, но для разных траекторий  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  размерности соответствующих элементов одинаковы. В этом случае элементы корреляционных матриц также размерны:  $[c_{v_i}] = [x_v][x_p]$ . Для обеспечения корректности вычислений необходимо, чтобы элементы единичной матрицы также были размерны и их размерности совпадали с размерностями соответствующих элементов корреляционной матрицы. Вычисленное значение расстояния  $d_G$  в этом случае безразмерно, хотя на него будут влиять изменения размерности параметров с учетом масштаба. Решение задач (2) и (3) зависит от выбранного значения  $d_0$ , которое может меняться в зависимости от масштаба измерения.

### Использование фазового портрета

При использовании метрики (4), (5) для анализа временных рядов возникают две проблемы:

1. При  $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$   $d_G = 0$  вне зависимости от направления траекторий.

2. Если  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  – противоположно направленные траектории, то корреляция между ними существенна и не отличается от корреляции между сонаправленными траекториями. Вместе с тем расстояние между такими траекториями должно быть существенно.

Для решения этих проблем необходимо учитывать направление изменения параметров предприятий, а не ограничиваться изучением временного ряда, как статистического множества точек. Расширим пространство параметров, добавив скорости изменения параметров предприятий, а, в случае достаточно большого периода наблюдений – изменения скоростей параметров предприятий. При гладкой аппроксимации параметров полученный вектор можно записать, как  $z(t) = (x(t), x'(t), x''(t))$ . Размерность пространства при этом увеличивается до  $3N$ .

Равенство средних значений векторов  $z_1(t)$ ,  $z_2(t)$  может быть достигнуто только при равных значениях  $\bar{x}_1 = \bar{x}_2$ ,  $\bar{x}'_1 = \bar{x}'_2$  и  $\bar{x}''_1 = \bar{x}''_2$ , что соответствует одинаковым направлениям первых двух производных. Одновременно решается и вторая задача, так как при противоположно направленных траекториях скорости изменения параметров отличаются знаками, что существенно увеличивает расстояние между траекториями.

Вектор  $z(t)$  формирует фазовую траекторию предприятия. При формировании кластеров фазовых траекторий можно путем экстраполяции средних фазовых траекторий определить ожидаемые значения параметров при различ-

ных горизонтах планирования, выделить точки слияния фазовых траекторий и, наоборот, точки бифуркаций. Анализ кластеризованных фазовых траекторий позволит значительно расширить возможности экономического анализа в условиях больших данных. Для этого в  $3N$ -мерном пространстве требуется выделить области благоприятного и неблагоприятного финансового состояния, как дополнительные оценочные кластеры. Вероятностная мера приближения фазовых траекторий к оценочным кластерам может быть использована в качестве критерия финансового благополучия предприятия.

Аналогично можно выделить оценочные кластеры и для других событий, которые могут быть предметом финансового или иного социально-экономического анализа предприятий.

### Литература

1. Галицкая Ю. Н., Тхагапso М. Б. Методические основы прогнозирования финансовой устойчивости организации // Управление экономическими системами: электронный научный журнал, 2014. №4(64) [Электронный ресурс] <http://uecs.ru/uecs64-642014/item/2853-2014-04-14-07-10-59>.
2. Басовский Л. Е. Прогнозирование и планирование в условиях рынка. М.: ИНФРА-М, 2010. 258 с.
3. Старокожева Л. Г., Ларькина Е. В. Определение финансовой устойчивости отрасли: проблемы построения динамической модели // Таможенная политика России на Дальнем Востоке, 2008. №2(43). С. 106-115.
4. Касьяненко Т. Г., Полоско А. С. Применение корреляционно-регрессионного анализа в оценке бизнеса сравнительным подходом // Российское предпринимательство, 2015. №20. С. 3611-3622.
5. Амелёнков А.А. Инновационная деятельность: принципы бюджетного учета // Вестник Московского государственного лингвистического университета, 2012. №641. С.9-21.
6. Березин И. С. Практика исследования рынков. М.: Бератор-Пресс, 2003. 376 с.
7. Ландсбаум М. Маркетинг. 21 век: учеб.-практ. пособие. М.: ТК Велби, Проспект, 2006. 442 с.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных М.: Мир, 1989. 540 с.
9. Земенцкий Ю. В. Проблема экономической эффективности кластерных организаций // Проблемы обеспечения финансовой безопасности и эффективности экономических систем в XXI в. СПб.: Издательство Санкт-Петербургского университета технологий управления и экономики, 2017. С. 72-77.
10. Амелкин С.А., Захаров А. В., Хачумов В.М. Обобщенное расстояние Евклида-Махаланобиса и его свойства // Информационные технологии и вычислительные системы, 2006. №4. С. 40-44.
11. Хачумов В. М., Фраленко В. П. Эксперименты с прогнозированием, сжатием, фильтрацией данных на основе искусственных нейронных сетей // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2008. №9. С. 35-43.

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

УДК 615.2, 615.31

**О СПОСОБАХ СИНТЕЗА 2,3-ДИГИДРО-5-НИТРО-1,4-ФТАЛАЗИНДИОНА, КАК ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВНОЙ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОЙ СУБСТАНЦИИ 2,3-ДИГИДРО-5-НИТРО-1,4-ФТАЛАЗИНДИОНА НАТРИЯ (ЛЮМИНОЛА НАТРИЯ), ОСНОВЫ ДЛЯ ПРЕПАРАТА ТАМЕРОН**

**METHODS FOR THE SYNTHESIS OF 2,3-DIHYDRO-5-NITRO-1,4-PHTHALAZINEDIONE, AS AN INTERMEDIATE PRODUCT FOR THE PRODUCTION OF ACTIVE PHARMACEUTICAL INGREDIENTS, 2,3-DIHYDRO-5-NITRO-1,4-PHTHALAZINEDIONE SODIUM (LUMINOL SODIUM SALT), THE BASIS FOR DRUG TAMERON**

**Артём Михайлович Ермаков**  
кандидат биологических наук  
ведущий специалист-исследователь  
отдел химико-биологических исследований  
МОУ «ИИФ»  
ведущий научный сотрудник  
Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл.,  
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3  
Тел. +7 (4967) 73-94-28  
E-mail: ao\_ermakovy@rambler.ru

**Ольга Павловна Горло**  
начальник  
Фармацевтический производственный центр  
МОУ «ИИФ»  
врач-терапевт  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967) 35-31-93  
E-mail: orgorlo@iifmail.ru

**Юлия Валерьевна Краснова**  
кандидат технических наук  
главный технолог фармацевтического  
производства  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967) 35-31-93  
E-mail: iuvkrasnova@iifmail.ru

**Владимир Станиславович Вольский**  
кандидат химических наук  
ведущий научный сотрудник  
отдел медико-биологический исследований  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967) 35-31-93  
E-mail: vsvolskii@iifmail.ru

**Михаил Абрамович Презент**  
кандидат химических наук  
научный сотрудник  
ИОХ РАН им. Н.Д. Зелинского  
Адрес: 119991, Москва,  
Ленинский проспект, д. 47  
Тел.: +7 (903)793-89-62  
E-mail: pre1962@mail.ru

**Алексей Николаевич Царьков**  
заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор  
Президент Института –  
Председатель Правления Института  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967) 35-31-93  
E-mail: info@iifmail.ru

**Денис Сергеевич Руднев**  
генеральный директор  
АО «Столетика»  
Адрес: 142211, Московская обл., г. Серпухов,  
Московское ш., д. 42, кв. 106  
Тел.: +7(985) 090-07-52  
E-mail: Denissrudnef@gmail.com

### Аннотация

В статье рассматривается проблема химического синтеза одного из ключевых интермедиатов 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндиона (люминола), который в дальнейшем является реагентом для синтеза 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндиона натрия (люминола натрия). Последнее вещество является основой для получения активной фармацевтической субстанции и препарата **TAMERON**. В рамках выполнения субсидии Минпромторга России (Соглашение от 29.06.2021 г. №020-11-2021-1094) на разработку новых лекарственных форм и развития базы для производства по полному циклу – от реактива и фармацевтической субстанции до готовой лекарственной формы в МОУ «ИИФ» был разработан новый экологичный, безопасный и эффективный способ синтеза высокочистого 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндиона, который был оформлен в виде ноу-хау.

**Ключевые слова:** **TAMERON** (2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндион натрия, люминол натрия), 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндион (люминол), химический синтез, ноу-хау.

### Summary

The article discusses the problem of chemical synthesis of one of the key intermediates of 2,3-dihydro-5-nitro-1,4-phthalazinedione (luminol), which is subsequently a reagent for the synthesis of 2,3-dihydro-5-nitro-1,4-phthalazinedione sodium salt (luminol sodium salt). The last substance is the basis for the production of active pharmaceutical ingredients and the drug **TAMERON**. As part of the implementation of the subsidy of the Ministry of Industry and Trade of Russia (Agreement of 06/29/2021 No. 020-11-2021-1094) for the development of new dosage forms and the development of a base for full-cycle production - from a reagent and a pharmaceutical substance to a finished dosage form, IPI «IEP» was developed a new environmentally friendly, safe and efficient method for the synthesis of high-purity 2,3-dihydro-5-nitro-1,4-phthalazinedione, which has been formalized as a know-how.

**Keywords:** **TAMERON** (2,3-dihydro-5-nitro-1,4-phthalazinedione sodium, sodium luminol), 2,3-dihydro-5-nitro-1,4-phthalazinedione (luminol), chemical synthesis, know-how.

В настоящее время известные методики синтеза 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндиона используют сложные и трудоемкие процессы и чистый гидразин для ввода 2 атомов азота в гетероциклическое соединение. Гидразин токсичен, а его присутствие в реактиве и АФС для получения лекарственного препарата недопустимо.

Исторически синтез 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндиона проводится с момента открытия из 3-нитрофталево́й кислоты и гидразина [1]. Описан синтез искомого соединения из 3-нитрофталево́й кислоты и гидразина в растворе декалина или тетралина при 160-180°C. Далее смесь выпаривали при высокой температуре и получали 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндион [2]. В британском патенте GB 110091A описан синтез производных фталазина [3]. Среди предложенных способов используется смесь дикарбоновой кислоты и гидразина, причем смесь нагревают с обратным холодильником в течение 4 часов. Раствор охлаждают и добавляют воду и HCl до pH 7. Образовавшееся твердое вещество перекристаллизовывают в горячей воде. Американский патент US 4226992 описывает образование фталазида из дикарбоновой кислоты и гидразина в метаноле при кипячении с обратным холодильником в течение 3 часов. После охлаждения смесь упаривают досуха в роторном испарителе и кристаллический остаток сушат в течение ночи при 80°C под вакуумом [4].

В американском патенте US 4226993 описана реакция, где фталид смешивали с гидразином в этаноле в течение 2 часов при кипячении с обратным холодильником с последующим ох-

лаждением и выдержкой в течение ночи. После выпаривания в роторном испарителе при пониженном давлении твердое вещество сушили при 110°C в течение 8 часов под давлением 0,1 мм рт. Твердый остаток перемешивали в течение 90 минут в 10% HCl, фильтровали и нейтрализовали KOH, а выпавший осадок фильтровали, сушили и перекристаллизовывали из водного диметилформамида [5].

Также предлагался синтез 3-аминофталгидразида из 3-нитрофталево́го ангидрида и гидразина с помощью катализатора на основе Ni-Ренея при температурах порядка 285-290°C с выходом порядка 85-90% [6]. Описана реакция получения 3-нитрофталгидразида в присутствии пентахлорида ниобия в диоксане [7]. Описан синтез 3-аминофталгидразида для последующего получения фармакологически-чистого люминола натрия из 3-нитрофталево́го ангидрида и гидразина в присутствии уксусной кислоты при нагревании до 75°C в течение 16 часов [8].

Учитывая вышеуказанные описания процессов синтеза 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндиона можно сделать вывод о том, что большинство известных методов мало подходят для производства реактива и субстанции – люминола натрия и их использования в фармакологических целях. Поэтому в рамках выполнения субсидии Минпромторга России (Соглашение от 29.06.2021г. №020-11-2021-1094) на разработку новых лекарственных форм и развития базы для производства по полному циклу – от реактива и фармацевтической субстанции до готовой лекарственной формы в МОУ "ИИФ" был

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

разработан новый способ синтеза 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндиона, который был оформлен в виде ноу-хау.

Разработанный новый способ получения этого соединения отличается принципиальной новизной и экологичностью. Получаемый 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндион будет использован для получения высокочистого, пригодного для фармакологического использования люминола натрия.

### Литература

1. Schmitz A.J. Diss. Heidelberg, 1902.
2. Синтезы органических препаратов, 1953. Т. 4. С.372.
3. GB 1100911A Phthalazine derivatives 1963-08-20 Application filed by BENDER LAB Ltd
4. US4226992A Amino-functionalized naphthalene-1,2-dicarboxylic acid hydrazides 1978-07-24 Priority to US05/927,286. Current Assignee Bayer Corp.
5. US 4226993A. Amino-functionalized phthalhydrazides 1978-07-24 Miles Laboratories, Inc.
6. US 6489326B1. Medicinal preparation and process for manufacturing thereof 2000-03-28 Priority to RU2000107351 Abidov M.
7. US 7517983B2. Hydrazines and derivatives production process from hydrazines and dicarboxylic acid 2003-11-25 Priority to BRPI0307864A Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ.
8. US 20100222584A1. Pharmaceutical grade phthalazinediones, process for their preparation and pharmaceutical compositions containing them 2009-02-06 Priority to US15058109P Bach Pharma Inc.



## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

УДК 615.2, 615.31

### К ВОПРОСУ ОБ ОТКРЫТИИ ЛЮМИНОЛА И ЛЮМИНОЛА НАТРИЯ, ИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФОРМ И ЛЕКАРСТВЕННЫХ СВОЙСТВ

### ON THE DISCOVERY OF LUMINOL AND LUMINOL SODIUM SALT, THEIR CRYSTALLINE FORMS AND MEDICINAL PROPERTIES

**Артём Михайлович Ермаков**  
кандидат биологических наук  
ведущий специалист-исследователь  
отдел химико-биологических исследований  
МОУ «ИИФ»  
ведущий научный сотрудник  
Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл.,  
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3  
Тел. +7 (4967) 73-94-28  
E-mail: ao\_ermakovy@rambler.ru

**Владимир Станиславович Вольский**  
кандидат химических наук  
ведущий научный сотрудник  
отдел медико-биологический исследований  
фармацевтического производственного центра  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7(4967) 35-31-93  
E-mail: vsvolskii@iifmail.ru

**Елена Александровна Царькова**  
Генеральный директор  
Медицинская клиника «АксиоМед»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
ул. 2-я Московская, д. 6, к. 5, помещ. 4А  
Тел.: +7 (4967) 12-84-88  
E-mail: axiomed@mail.ru

#### Аннотация

В статье рассматривается история открытия люминола натрия и его кристаллических форм, а также фармакологические препараты на его основе. Показано, что фармакологические свойства фталазинов и их производных были обнаружены в 70-х годах XX столетия, а первый препарат на основе люминола натрия был зарегистрирован в 1997 году. Особое внимание уделяется кристаллическим формам люминола натрия, которых в настоящее время известно шесть. Каждый фармакологический препарат на основе люминола натрия отличается друг от друга кристаллическими формами этого вещества, в которых он представлен. Очевидно, различия в кристаллических формах может обуславливать различный фармакологический эффект или другие параметры, такие как фармакокинетика и фармакодинамика. История изучения люминола натрия как химического вещества и как вещества с фармакологическими свойствами показывает не только развитие знаний и представлений о нем как лекарственном препарате, но и намечает дальнейшие пути создания новых лекарственных форм с новыми свойствами и применения этого вещества в медицине и биологии.

**Ключевые слова:** 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндион натрия, (люминол натрия), 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндион (люминол), кристаллические формы, **TAMERON, TAMERIT, GALAVIT.**

#### Summary

The article deals with the history of the discovery of luminol sodium salt and its crystalline forms, as well as pharmacological preparations. It was shown that the pharmacological properties of phthalazines and their derivatives were discovered in the 70s of the XX century, and the first drug based on luminol sodium salt was registered in 1997. Special attention is paid to the crystalline forms of luminol sodium salt, which are currently known six. Each pharmacological preparation based on luminol sodium salt differs from each other in the crystalline forms of this substance in which it is presented. Obviously, differences in crystalline forms can cause different pharmacological effects or other parameters, such as pharmacokinetics and pharmacodynamics. The history of the study of luminol sodium salt as a chemical substance and as a substance with pharmacological properties shows not only the development of knowledge and ideas about it as a drug, but also outlines further ways to create new dosage forms with new properties and the use of this substance in medicine and biology.

**Keywords:** 2,3-dihydro-5-nitro-1,4-phthalazinedione sodium salt, (luminol sodium salt), 2,3-dihydro-5-nitro-1,4-phthalazinedione (luminol), crystalline forms, **TAMERON, TAMERIT, GALAVIT.**

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

В 2020 году МОУ «Институт инженерной физики» зарегистрировал лекарственный препарат **ТАМЕРОН**, основой которого является натриевая соль 2,3-дигидро-5-нитро-1,4-фталазиндиона (люминол натрия). Несмотря на достаточно давнюю известность препаратов на основе люминола натрия (**ГАЛАВИТ** и **ТАМЕРИТ**) интерес представляет история открытия и применения люминола и его солей, а также лекарственных свойств этих веществ и разнообразия кристаллических форм.

Впервые люминол (3-аминофталгидразид) был синтезирован во второй половине XIX века. Повторное переоткрытие этого вещества произошло в 1902 году, когда его выделили в виде твердого органического соединения и это было описано в немецкой диссертации Шмидза [1]. В 1913 году Куртиус и Семпер упростили процесс синтеза люминола и впервые описали его способность к слабой люминесценции, причем в кислых условиях [2]. С этого момента интерес к люминолу, как химического соединения, проявляется именно из-за этого интересного свойства.

Открытие более интенсивной хемилюминесценции люминола было сделано в исследовательской лаборатории IG Farben (Lommel), но оно не было опубликовано. Позднее, в 1928 г., немецкий химик Х.Х. Альбрехт опубликовал работу, в которой продемонстрировал реакцию свечения люминола в щелочных условиях в присутствии пероксида водорода [3]. В этой же работе он впервые предложил механизм этой реакции.

В 1936 году Karl Gleu и Karl Pfannstiel в своих исследованиях обнаружили, что интенсивность хемилюминесценции значительно возрастает в присутствии гематина из крови [4]. Позднее немецкий судебно-медицинский эксперт Вальтер Шпехт провел обширные исследования применения люминола для обнаружения следов крови на месте преступления [5]. Эти работы были подхвачены патологами из США Фредериком Проешером и А.М. Муди, которые создали компанию «Проешер и Муди» и активно начали внедрять этот метод в судебно-медицинскую практику [6].

В дальнейшем, состав реагентов с применением люминола совершенствовался, и помимо применения в криминалистике он стал использоваться в медицине как реагент для иммунохемилюминесцентного анализа – для высокочувствительной количественной идентификации антигенов и антител [7] и биологии – для определения активных форм кислорода и гидроксильных радикалов [8].

Несмотря на длительную историю люмино-

ла, как химического соединения, его кристаллические структуры были описаны только в 1992 году [9]. В работе [10] описаны 2 кристаллические формы люминола (названные как форма I и форма II).

Большой интерес к люминолу возник после появления информации о том, что натриевая соль люминола обладает иммуномодулирующими свойствами. Стоит четко отметить, что прямые лекарственные противовоспалительные свойства собственно фталазинов (родственных люминолу соединений) были описаны в патентах, начиная с 1984 года [11,12], а предположение лекарственных свойств именно люминола (аминофталгидразида) отображено в патенте US 94832686A [13]. Применение люминола натрия как лекарственного средства было впервые описано в патентах 1993 года [14,15]. В 1996 году появляется название лекарственного препарата на основе натриевой соли люминола – **ГАЛАВИТ**, в 1997 – первое регистрационное удостоверение на препарат (товарный знак зарегистрирован в 2001 году) [16,17]. Позднее в патентах описаны различные способы получения люминола натрия путем синтеза из исходных компонентов – 3-нитрофталево́й кислоты и гидразингидрата [18], а также его различных солей щелочных и щелочноземельных металлов [19], и препаратов на основе смеси солей люминола щелочных металлов [20].

Различные кристаллические формы безводной натриевой соли люминола были впервые описаны в 2010 году в патенте EP2774920A1 [21]. В работе показано наличие 2-х кристаллических форм люминола натрия (названы как форма I и форма II), причем продемонстрирована их различная фармакологическая активность, очевидно связанная с разной растворимостью этих кристаллических форм в воде. Растворимость безводных кристаллов была гораздо выше, чем кристаллов дигидрата люминола натрия, описанного ранее [18].

В 2013 году были описаны кристаллические формы других гидратированных и негидратированных солей щелочных металлов люминола (Na<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup> и Cs<sup>+</sup>), также в этой работе была описана кристаллическая форма люминола натрия, которая была зарегистрирована в Кембриджской структурной базе данных под аббревиатурой VINFIIP (рисунк 1) [22].

В 2014 году Рыбаков и др. обнаружили две полиморфные кристаллические структуры негидратированного люминола натрия, очевидно аналогичные показанным ранее в патенте EP2774920A1 (форма B1 [9d]), зарегистрированы в Кембриджской структурной базе данных под

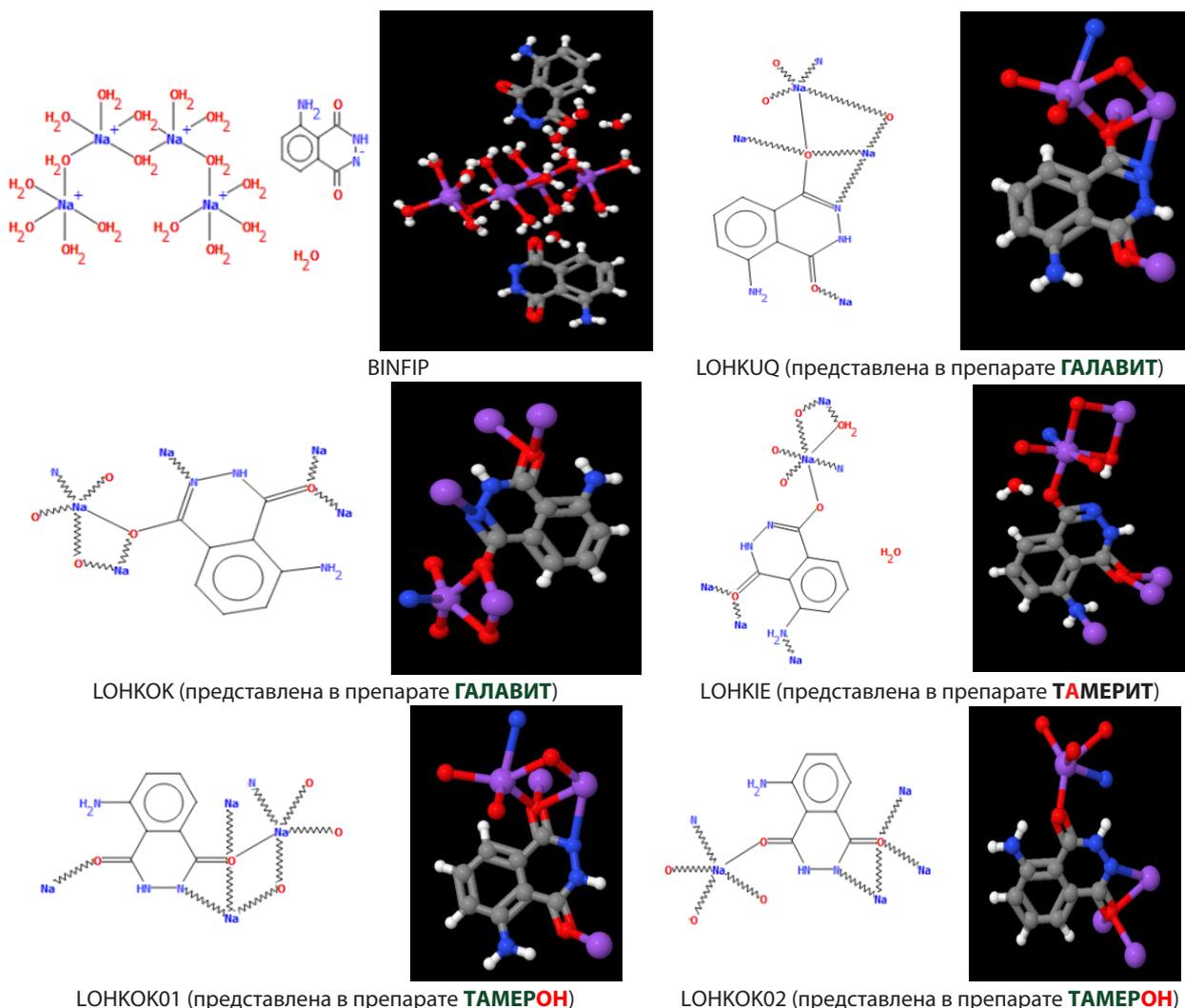
## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

номером 931683 (форма II, ЛОНКУQ) (рисунк 1) и форма В2 [9d], под номером 931684 (форма I, ЛОНКОК) (рисунк 1)), также была описана кристаллическая структура моногидрата люминола натрия (форма А, ЛОНКИЕ, 931685) (рисунк 1) [23]. В работе Martin et al. были получены и описаны более чистые кристаллические формы люминола натрия, которые были зарегистрированы под кодами ЛОНКОК01 и ЛОНКОК02 (рисунк 1) [24].

В 2000 году был зарегистрирован препарат на основе люминола натрия – **ТАМЕРИТ** (РУ №2000/113/5) в виде порошка для приготовления раствора для внутримышечного введения. После регистрации он также исследовался и упоминался как моногидратированная соль

люминола натрия (в документах также упоминается безводная соль люминола натрия – как **ГАЛАВИТ**) [23, 25, 26]. В 2020 году **ТАМЕРИТ** был зарегистрирован в лекарственной форме (ЛП-006299-260620) в виде лиофилизата. Если охарактеризовать препараты **ГАЛАВИТ** и **ТАМЕРИТ** с точки зрения кристаллической структуры, то первый является кристаллической формой ЛОНКИЕ, а второй препарат – смесью безводных кристаллических форм ЛОНКОК и ЛОНКУQ [23].

В 2015 году появляется новый препарат на основе люминола натрия – **ТАМЕРОН** [27], представляющего собой лиофилизат. Как было показано в патенте RU2744858C1 [28], в зависимости от технологии лиофилизации люминол натрия



**Рис. 1.** Типы кристаллических структур люминола натрия, зарегистрированные в Кембриджской структурной базе данных и препараты, в которых представлены эти формы. Форма BINFIP (973889)  $a$  7.952(2)Å  $b$  13.168(3)Å  $c$  13.734(3)Å,  $\alpha$  74.180(14)°  $\beta$  88.629(11)°  $\gamma$  82.050(17)°; форма ЛОНКУQ (931683)  $a$  14.7157(18)Å  $b$  3.7029(19)Å  $c$  16.0233(15)Å,  $\alpha$  90.00°  $\beta$  116.682(13)°  $\gamma$  90.00°; форма ЛОНКОК (931684)  $a$  27.7765(15)Å  $b$  3.3980(19)Å  $c$  8.1692(19)Å,  $\alpha$  90.00°  $\beta$  90.00°  $\gamma$  90.00°; форма ЛОНКИЕ (931685)  $a$  8.3429(4)Å  $b$  22.0562(11)Å  $c$  5.2825(2)Å,  $\alpha$  90.00°  $\beta$  99.893(3)°  $\gamma$  90.00°; форма ЛОНКОК01 (1040228)  $a$  14.7172(7)Å  $b$  3.70031(10)Å  $c$  16.0055(8)Å,  $\alpha$  90°  $\beta$  116.715(3)°  $\gamma$  90°; форма ЛОНКОК02 (1040229)  $a$  8.0364(2)Å  $b$  3.69765(5)Å  $c$  26.4246(7)Å,  $\alpha$  90°  $\beta$  96.346(2)°  $\gamma$  90°

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

может образовывать кристаллы в виде смеси ЛОНКОК01 и ЛОНКОК02 кристаллических и аморфной форм в различных соотношениях. В ходе отработки способа и технологии лиофилизации препарата **ТАМЕРОН** удалось достигнуть стабилизации кристаллического состава препарата в формах ЛОНКОК01 и ЛОНКОК02. Эти формы отличны от кристаллических форм ранее известных препаратов – **ГАЛАВИТА** и **ТАМЕРИТ**. Поэтому можно утверждать, что несмотря на то, что **ГАЛАВИТ**, **ТАМЕРИТ** и **ТАМЕРОН** являются аналогичными фармакологическими препаратами, но кристаллические формы, и, следовательно, некоторые физико-химические и фармакологические свойства у этих препаратов могут быть различными.

В настоящее время ведутся активные исследования лекарственных форм люминола натрия за рубежом. В частности, швейцарская компания Метриофарм помимо выше указанного патента [21] имеет патенты на использование люминола натрия (он проходит под кодовым названием МР1032) для лечения: рассеянного склероза [29]; острого воспаления легких (в качестве аэрозольной формы) [30]. Также этой компанией проводились исследования по растворению люминола натрия в различных растворителях для возможности изготовления различных лекарственных форм этого вещества [31]. Эта же компания проводит клинические испытания люминола натрия для лечения хронического псориаза [32], коронавирусной инфекции [33].

Таким образом, история изучения люминола натрия как химического вещества и как вещества с фармакологическими свойствами показывает не только развитие знаний и представлений о нем как лекарственном препарате, но и намечает дальнейшие пути создания новых лекарственных форм с новыми свойствами и применения этого вещества в медицине и биологии.

### Литература

1. Schmitz A.J. Diss. Heidelberg 1902.
2. Curtius Th., Semper A. Chem. Ber., 1913. 46. Pp.1165-1170.
3. Albrecht H.O. Über die Chemiluminescenz des Aminophthalsäurehydrazids (On the chemiluminescence of aminophthalic acid hydrazide) // Zeitschrift für Physikalische Chemie, 1928. 136. Pp.321-330.
4. Gleu K., Pfannstiel K. Über 3-aminophthalsäure-hydrazid // Journal für Praktische Chemie, 1936. 146. Pp.137-150.
5. Specht W. Die Chemiluminescenz des Hämins, ein Hilfsmittel zur Auffindung und Erkennung forensisch wichtiger Blutspuren (The chemilumines-

cence of haemin, an aid to the finding and recognition of forensically significant blood traces) // Angewandte Chemie., 1937. 50(8). Pp.155-157.

6. Proescher F., Moody A.M. Detection of blood by means of chemiluminescence // Journal of Laboratory and Clinical Medicine, 1939. 24. Pp.1183-1189.
7. Schroeder H.R., Vogelhut P.O., Carrico R.J., Boguslaski R.C., Buckler R.T. Competitive protein binding assay for biotin monitored by chemiluminescence // Anal Chem., 1976. 48. Pp.1933-1937.
8. Sharma R.K., Agarwal A. Role of reactive oxygen species in male infertility // Urology, 1996. 48. Pp.835-850.
9. Paradies H.H., Ber. Bunsen-Ges. Phys. Chem., 1992. 96. Pp.1027-1031.
10. Martin T., Fleissner J., Milius W., Brey J., Behind Crime Scenes: The Crystal Structure of Commercial Luminol // Crystal Growth & Design, 2016. 16(5). P.3014-3018.
11. Патент US4665181A. Anti-inflammatory phthalazinones, дата приоритета 17.05.1984, срок действия истек.
12. Патент № JPS4931683A. Приоритет 27.07.1972.
13. Патент US94832686A. Pro drugs for selective drug delivery, дата приоритета 31.12.1986, срок действия истек.
14. Патент EP0617024A1. Pharmakologische Verwendung von Phthaloylhydrazid-Derivaten; ihre Zusammensetzung und Anwendung дата приоритета 19.02.1993, срок действия истек.
15. Патент US5512573A. Use of phthaloylhydrazide derivatives as anti-hypoxic and defensive agents, приоритет 19.02.1993, срок действия истек.
16. ФИПС. Товарные знаки, знаки обслуживания №226587 Российская Федерация. Товарный знак **ГАЛАВИТ** заявл 15.05.2001, опубл 12.12.2002. Правообладатель: СЭЛВИМ ЛТД., Республика Кипр, г. Лимассол.
17. Патент № RU2113222C1/ Иммуномодулирующее средство, Российская Федерация, патентообладатель Закрытое акционерное общество «Центр современной медицины «Медикор»», приоритет 30.09.1997, не действует.
18. Патент № RU 2155043. Способ получения лекарственного препарата. Патентообладатель: Абидов М.Т., приоритет 28.03.2000, не действует.
19. Патент № RU 2169139. Способ получения щелочных или щелочноземельных солей 5-амино-2,3-дигидро-1,4-фталазиндиона. Патентообладатель: Закрытое акционерное общество «Центр современной медицины «Медикор»», приоритет 02.08.2000, не действует.
20. Патент № RU2211036C2. Лекарственный препарат (варианты) и способ его производства. Патентообладатель: Общество с ограниченной

## СОВРЕМЕННАЯ МЕДИЦИНА И ФАРМАЦЕВТИКА

ответственностью «Абидофарма», приоритет 20.11.2001, не действует.

21. Патент № EP2774920A1. Crystalline forms of 5-amino-2,3-dihydrophthalazine-1,4-dione sodium salt and their medical use. Патентообладатель: Метириофарм (Швейцария), дата приоритета 2010 год, действует.

22. Guzei I.A., Kim M.-H., West R., J. Coord. Chem, 2013. 66. Pp.3722-3739.

23. Rybakov V.B., Chernyshev V.V., Paseshnichenko K.A., Sheludyakov V.D., Belyakov N.G., Boziev R.S., Mochalov V.N., Storozhenko P.A. // Crystallogr. Rep., 2014. 59. Pp.383-393.

24. Martin T., Greim D., Milius W., Niedermair M., Ludescher B., von Wegerer J., Brysch W., Barwinkel K., Senker J., Breu J. Z. // Anorg. Allg. Chem., 2015. 641. Pp. 332-338.

25. Патент № RU 2625267. Способ производства нестерильных субстанций безводного «**ТАМЕРИТА**» и/или двухводного «**ГАЛАВИТА**» – натриевых солей 5-амино-2,3-дигидрофталазин-1,4-диона (варианты) и способы дальнейшей их переработки в стерильные лекарственные препараты. Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «АБИДАФАРМА» приоритет 22.09.2016, действует.

26. ФИПС. Товарные знаки, знаки обслуживания № 628238 Российская Федерация. Товарный знак **ГАЛАВИТ**. Заявл 20.02.2016, опублик. 30.08.2017. Правообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «АБИДАФАРМА».

27. ФИПС. Товарные знаки, знаки обслуживания № 598830 Российская Федерация. Товарный знак **ТАМЕРОН**. заявл 16.12.2015, опублик.

25.12.2016. Правообладатель: Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики», 142210, Московская область, г. Серпухов, Большой Ударный пер., 1А (RU).

28. Патент №2744858 Российская Федерация. СПК C07D237/32 (2020.08);A61K31/502 (2020.08); A61K9/19 (2020.08) Способ получения лиофилизата аминоксидогидрофталазиндиона натрия – лекарственного препарата «**ТАМЕРОН**»: 2020116296: заявл. 28.04.2020 опублик. 16.03.2021. Патентообладатель: Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (RU), действует.

29. Патент № EP16002355. Use of 5-amino-2,3-dihydro-1,4-phthalazinedione in the treatment of chronic progressive multiple sclerosis. Патентообладатель: Metriopharm AG, приоритет 07.11.2016, действует.

30. Патент № EP3858328A1. Use of 5-amino-2,3-dihydro-1,4-phthalazinedione in the inhalatory treatment of inflammatory pulmonary diseases. Патентообладатель: Metriopharm AG, приоритет 25.03.2020, действует.

31. Патент № EP3511325A1. Method for solubilizing 5-amino-2,3-dihydro-1,4-phthalazinedione. Патентообладатель: Metriopharm AG, приоритет 11.01.2018, действует.

32. <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT03706209?term=Metriopharm&draw=2&rank=2> Study to Evaluate Efficacy and Safety of MP1032 in Patients With Chronic Plaque Psoriasis.

33. <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT04932941?term=Metriopharm&draw=2&rank=1>. MP1032 Treatment in Patients With Moderate to Severe COVID-19.



# ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 006:007.52:623

## ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ В ПРАКТИКУ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ

## PROBLEMATIC ISSUES OF THE INTRODUCTION OF STANDARDIZATION AND UNIFICATION INTO THE PRACTICE OF THE DEVELOPMENT AND CREATION OF ROBOTIC WEAPONS



### Евгений Александрович Антохин

научный сотрудник  
ФГБУ «46 ЦНИИ» МО РФ  
Адрес: 129327, Москва,  
Чукотский проезд, д. 10  
Тел.: +7(962) 984-65-17  
E-mail: johncoin@mail.ru

### Олег Игоревич Атакищев

доктор технических наук, профессор  
заместитель генерального директора  
по специальным проектам  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: aoi007@mail.ru

### Евгений Валерьевич Умников

ведущий инженер  
МОУ «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: rtc@iifmail.ru

### Дмитрий Владимирович Грачёв

начальник лаборатории  
ФГБУ «27 ЦНИИ» МО РФ  
Адрес: 125284, Москва,  
1-й Хорошевский проезд, д. 5  
Тел. 8 (495) 945-77-80

### Аннотация

В статье проведен краткий анализ состояния существующих научно-технических проблем процессов внедрения стандартизации и унификации в практику разработки и создания роботизированных образцов вооружения. На основе результатов анализа актуализирован перечень первоочередных мероприятий, направленных на решение критических задач по стандартизации и комплексной унификации базовых шасси (носителей), базовых компонентов и функциональных модулей робототехнических комплексов военного назначения.

**Ключевые слова:** унификация; стандартизация; система нормативных документов; робототехнический комплекс военного назначения; блочно-модульный принцип; базовый унифицированный компонент; унифицированный ряд функциональных модулей; унифицированная адаптивная операционная система.

### Summary

The article provides a brief analysis of the state and existing scientific and technical problems of the processes of introducing standardization and unification into the practice of developing and creating robotic weapons. Based on the results of the analysis, the list of priority measures aimed at solving critical tasks of standardization and comprehensive unification of basic chassis (carriers), basic components and functional modules of military robotic complexes is updated.

**Keywords:** unification; standardization; the system of normative documents; military-purpose robotic complex; block-modular principle; basic unified component; unified range of functional modules; unified adaptive operating system.

### Введение

Проводимые как в России, так и за рубежом мероприятия по строительству и развитию вооруженных сил свидетельствуют о возрастающей роли роботизации образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), которая постепенно приобретает характер доминирующего направления совершенствования и ка-

чественного обновления средств вооруженной борьбы [1, 2].

Отечественные и иностранные военные специалисты единогласны во мнении, что при создании робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН) комплексная унификация базовых платформ-носителей и функциональных модулей целевого оборудования, а также

стандартизация предъявляемых к ним требований позволят решить следующие задачи:

- сократить сроки разработки, освоения серийного производства и оснащения войск новейшими образцами военной робототехники;
- повысить технический уровень, надежность и, как следствие, боеготовность роботизированных образцов ВВСТ;
- упростить процессы снабжения, эксплуатации и подготовки расчетов;
- оптимизировать номенклатуру создаваемых образцов РТК ВН и предметов снабжения;
- существенно снизить производственные и эксплуатационные расходы [3-5].

Стоит также отметить, что необоснованно высокий уровень унификации, закладываемый в создаваемые образцы военной робототехники, способен привести и к негативным последствиям.

Так, применение в конструкции РТК ВН только лишь унифицированных узлов и агрегатов ограничивает широкое внедрение инноваций, сковывает развитие революционных технических и технологических решений. При таком подходе решить задачу достижения скачкообразного прироста тактико-технических характеристик (ТТХ) и боевой эффективности создаваемых перспективных роботизированных образцов ВВСТ становится практически невозможно.

Кроме того, бездумное следование идеям унификации и стандартизации в ряде случаев может стать причиной неоправданного увеличения конечной стоимости образцов РТК ВН за счет возникновения функциональной избыточности в ходе применения в конструкции пусть и хорошо отработанных, но дорогостоящих модулей.

По этой причине в ходе унификации должен достигаться разумный компромисс между эффективностью образца РТК ВН и его ролью при решении всей совокупности задач, между его специализацией и универсальностью.

В складывающихся условиях системное решение вопросов рациональной унификации, как органичной и неотъемлемой части единого процесса роботизации Вооруженных Сил Российской Федерации, представляется весьма актуальной научно-технической и организационной задачей.

### **Краткая характеристика текущего состояния проблематики в рассматриваемой предметной области**

Признавая несомненную значимость рассматриваемых вопросов для наращивания возмож-

ностей РТК ВН, военное руководство США инициировало ряд программ по разработке целого семейства нормативно-технических документов (Interoperability Profiles). Важнейшим из указанных документов является стандарт JAUS (Joint Architecture for Unmanned Systems), который содержит базовые требования к системам управления, манипуляторам, интерфейсам, контроллерам, функционально законченным модулям, средствам управления, программно-алгоритмическому обеспечению и элементам системы технического зрения [5, 6]. Сегодня требования стандарта JAUS обязательны к выполнению всеми производителями, задействованными в разработке наземных РТК ВН в интересах армии США. Кроме того, стало известно, что в последние годы проекты по созданию роботизированных образцов ВВСТ в Израиле также ведутся с учетом требований данного документа.

Постоянно повышающаяся значимость программного обеспечения перспективных образцов РТК ВН, обусловленная в первую очередь ростом требований к их автономности и интеллектуализации, стала толчком для активизации работ по унификации и в данном направлении. Разработанная в настоящее время за рубежом унифицированная адаптивная операционная система Robot Operating System (ROS) предоставляет программистам широкие возможности, избавляя от большинства трудоемких и рутинных функций, связанных, например, с перенастройкой коэффициентов усиления, калибровкой, тестированием и рядом других [5, 8]. Также средства ROS способны выполнять накопление данных (знаний) о типовых ошибках и результатах проводимых проверок.

Важной особенностью программной среды операционной системы ROS является поддержка повторного использования программного кода в ходе разработки и проведения исследований образцов робототехники. В результате существенно сокращаются сроки создания набора универсальных типовых библиотек прикладных программ, применение которых в дальнейшем способно значительно ускорить темпы развития военной робототехники в целом.

Иностранные военные аналитики выражают уверенность, что именно такой комплексный подход к стандартизации позволит отказаться от привязки к конкретному поставщику решений, применять во вновь создаваемых образцах военной робототехники все ранее созданные как аппаратные, так и программные средства, оперативно наращивать функциональные возможности безэкипажных машин, а в перспективе повысить уровень автономности РТК ВН и зало-

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

жить научно-техническую базу для реализации их группового применения.

В программном документе армии США «Дорожная карта по развитию безэкипажных средств на период до 2038 года» указываются следующие направления работ по унификации и стандартизации в области создания перспективных образцов военной робототехники:

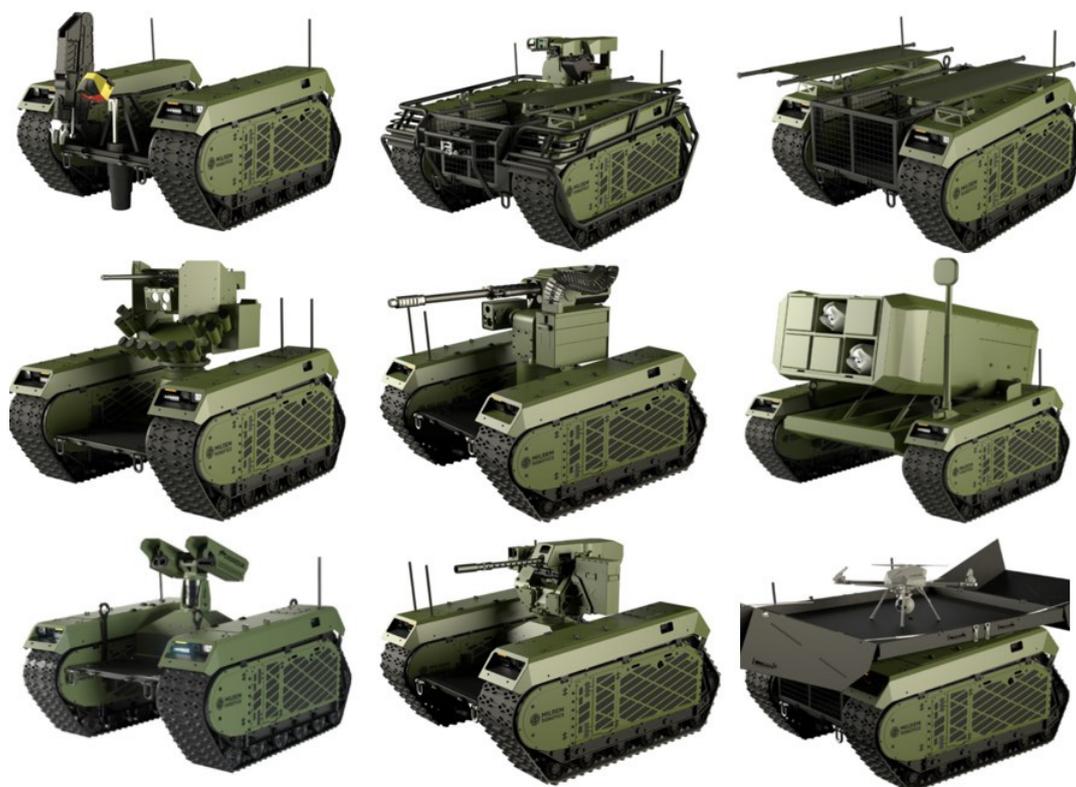
- развитие и реализация блочно-модульного принципа построения образцов РТК ВН;
- разработка на основе базовых образцов семейства безэкипажных машин различного предназначения;
- создание опережающего научно-технического задела в области разработки перспективных унифицированных составных компонентов РТК ВН;
- ограничение номенклатуры разрабатываемых образцов РТК ВН, а также разрешаемых к применению изделий и материалов.

По мнению как иностранных, так и российских экспертов, магистральным направлением работ по унификации и стандартизации, способным обеспечить достижение наибольшего технико-экономического эффекта, является реализация *блочно-модульного принципа* построения РТК ВН. Указанный принцип основан на применении в конструкции роботизированных образцов ВВСТ конструктивно законченных стан-

дартных составных частей (блоков, модулей, узлов и агрегатов), обладающих конструктивной, технологической, размерно-механической и информационно-сигнальной совместимостью, а также функциональной и геометрической взаимозаменяемостью (рисунк 1).

Внедрение блочно-модульного принципа способно обеспечить:

- применением широкой номенклатуры типовых модулей (блоков) для обеспечения многофункциональности РТК ВН;
- возможность реконфигурации состава навесного целевого оборудования (путем увеличения, уменьшения или перераспределения базовых составных элементов) с целью изменения функциональных свойств и возможностей РТК ВН в зависимости от характера решаемых задач;
- дальнейшее наращивание возможностей и военно-технического уровня РТК ВН заменой устаревших блоков на новые, разработанные с учетом развития и совершенствования программного обеспечения и элементной базы;
- снижение трудоемкости эксплуатации и ремонта за счет применения в конструкции РТК ВН унифицированных типовых элементов замены;
- продление сроков эксплуатации образцов РТК ВН путем замены блоков (модулей), выработавших свой ресурс [9,10].



**Рис. 1.** Пример реализации блочно-модульного принципа в конструкции наземного РТК ВН: варианты целевой нагрузки роботизированной платформы «ТHeMIS» производства «MILREM ROBOTICS»

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

Отечественными военными специалистами и конструкторами также предпринимаются попытки по обоснованию номенклатуры разрабатываемых образцов РТК ВН и унификации применяемых технических решений, делаются активные шаги по систематизации требований, предъявляемых к составным элементам роботизированных образцов ВВСТ.

Можно с уверенностью утверждать, что общее направление проводимых в нашей стране работ по унификации и стандартизации, а также применяемые при этом подходы в основном совпадают с зарубежными, близки с ними по целям, задачам и способам их решения. Однако, незавершенность разработки ключевых нормативных документов, недостаточное финансирование, отсутствие целенаправленной координации создают предпосылки к разрозненности и бессистемности выполняемых мероприятий, препятствуют преемственному использованию в новых разработках наилучших из найденных программно-технических решений. Такая ситуация приводит к увеличению многообразия предметов снабжения, средств контроля, диагностики и испытаний, росту стоимости принимаемых на вооружение образцов РТК ВН и, наконец, делает невозможным реализацию их группового применения в составе мультиагентных сетцентрических систем [5,11].

На современном этапе развития отечественной военной робототехники общее состояние российских разработок в рассматриваемой области можно охарактеризовать преобладанием следующих тенденций:

- дезинтеграция усилий научно-исследовательских организаций и предприятий военно-промышленного комплекса по созданию требуемого научно-технического задела, фрагментарное дублирование выполняемых проектов и проводимых исследований;

- низкий уровень освоения серийного производства;

- наличие на внутреннем российском рынке большого количества различных роботизированных платформ, разработанных, как правило, в инициативном порядке и близких по массогабаритным показателям и ТТХ;

- уникальность применяемых при создании российских роботизированных платформ технологий, технических и программных решений (даже в образцах одного предприятия-разработчика);

- недостаточная реализация блочно-модульного принципа построения в существующих и разрабатываемых РТК ВН, приводящая к невозможности выделения из общей конструкции

функциональных программно-аппаратных компонентов;

- отсутствие действенных механизмов межведомственной и межвидовой унификации базовых компонентов РТК военного, двойного и специального назначения;

- незавершенность разработки требуемого перечня единых нормативных документов, устанавливающих требования к базовым шасси (носителям), составным компонентам целевого оборудования и программному обеспечению РТК ВН.

### **Предложения в перечень первоочередных мероприятий по внедрению унификации и стандартизации в практику разработки отечественных роботизированных образцов вооружения**

Анализ существующих научно-технических проблем и сдерживающих факторов, препятствующих внедрению стандартизации и унификации в практику разработки роботизированных образцов ВВСТ, позволяет предложить следующий перечень первоочередных работ в указанной области.

1. Создание и обновление требуемого научно-технического задела в части методического и информационного обеспечения мероприятий по стандартизации и унификации (разработка необходимых моделей, методик, методов и т.д.) с учетом последних достижений науки и техники.

2. Разработка и развитие системы нормативных документов по стандартизации, регламентирующих порядок разработки и производства РТК ВН (нормативно-технических документов Системы общих технических требований, стандартов, общероссийских классификаторов, ограничительных перечней), контроль за их соблюдением.

3. Развитие унифицированной элементной базы и материаловедческой отрасли в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к перспективным образцам РТК ВН.

4. Разработка параметрических, типоразмерных и конструктивно унифицированных рядов базовых компонентов и функциональных модулей перспективных образцов РТК ВН.

5. Широкое внедрение блочно-модульного принципа в практику разработки роботизированных образцов ВВСТ в целях реализации механизма рационального заимствования разработанных ранее и уже освоенных в серийном производстве изделий.

6. Разработка (отбор) базовых шасси (носителей) РТК ВН по каждому классу и создание на их основе семейств унифицированных роботизированных образцов ВВСТ для решения широкого спектра боевых и обеспечивающих задач.

7. Выработка и реализация эффективных механизмов координации усилий научно-исследо-

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

вательских организаций, предприятий оборонно-промышленного комплекса, деятельности планирующих и заказывающих органов МО РФ в целях формирования и проведения единой технической политики при решении критических важных проблемных вопросов.

### Выводы

1. В настоящее время проводимые в России мероприятия по стандартизации и унификации РТК ВН характеризуются ограниченным финансированием, отсутствием целенаправленной координации и, как следствие, недостаточной интенсивностью.

2. Постоянно возрастающие требования по повышению автономности и интеллектуализации роботизированных образцов вооружения обуславливают неуклонное повышение значимости программно-алгоритмического обеспечения. В сложившихся условиях разработка адаптивных унифицированных операционных систем, необходимых библиотек прикладных программ, а также реализация действенных механизмов поддержки преемственного заимствования программного кода представляется крайне актуальной задачей стандартизации и унификации процессов разработки РТК ВН на ближайшую перспективу.

3. В целях системного решения вопросов стандартизации и рациональной унификации процессов разработки базовых шасси (носителей), базовых компонентов и функциональных модулей РТК ВН, проведения единой технической политики в рассматриваемой области требуется разработка *Межведомственной комплексной целевой программы*, реализация которой позволит обеспечить эффективную интеграцию усилий предприятий промышленности, заказчиков и потребителей роботизированных образцов ВВСТ.

### Литература

1. Ромانيюта А.Е., Негара А.А., Антохин Е.А. Актуальные проблемы развития роботизированного вооружения Сухопутных войск // Робото-

техника и техническая кибернетика, 2020. Т. 8. № 2. С.112-118.

2. Ковалев В.Г., Метелев Д.Н. Перспективы развития робототехнических комплексов как вида вооружения и военной техники // Военное обозрение, 2020. № 2(8). С.104-108.

3. Цариченко С.Г., Антохин Е.А., Чернова П.Д., Дементей В.П. Состояние и проблемы стандартизации и унификации наземных робототехнических комплексов военного назначения // Робототехника и техническая кибернетика, 2020. Т. 8. № 1. С.18-23.

4. Чиров Д.С., Новак К.В. Перспективные направления развития робототехнических комплексов военного назначения // Вопросы безопасности, 2018. №2(8). С.50-59.

5. Соколов С.М., Богуславский А.А., Веревкин А.С., Демьянов В.В. Тенденции развития мобильных средств и проблемы их реализации в отечественной робототехнике // В сборнике: Роботизация ВС РФ. Сборник статей V военно-научной конференции, 2020. С.31-47.

6. Ветлугин Р., Васильков А. Робототехнические комплексы сухопутных войск США и взгляды военных специалистов на их применение // Зарубежное военное обозрение, 2016. №6. С.55-59.

7. Unmanned systems integrated roadmap FY 2013-2038. - Approved for open publication, reference number 14-S-0553.

8. Newman W. A Systematic Approach to Learning Robot Programming with ROS. CRC Press, 2018.

9. Рудианов Н.А., Хрущев В.С. Функциональный подход к проектированию специализированных робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2019. №1(203). С. 18-27.

10. Лопота А.В., Спаский Б.А. Мобильные наземные робототехнические комплексы профессионального назначения // Робототехника и техническая кибернетика, 2020. Т. 8. № 1. С.5-17.

11. Антохин Е.А. Проблемные вопросы реализации группового применения наземных робототехнических комплексов военного назначения // Известия Института инженерной физики, 2021. №1(59). С.92- 98.



## ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ



УДК 378.1

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ – ВАЖНЕЙШЕЕ НАПРАВЛЕНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБОРОНОСПОСОБНОСТИ И НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

### IMPROVING THE MILITARY EDUCATION SYSTEM IS THE MOST IMPORTANT AREA OF ENSURING DEFENSE AND NATIONAL SECURITY

**Игорь Анатольевич Обычный**  
кандидат педагогических наук  
заместитель начальника факультета  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная д. 17  
Тел.: 8 (4967) 72-19-11  
E-mail: igorobynochnyu@mail.ru

**Юрий Николаевич Федоренко**  
начальник факультета  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная д. 17  
Тел.: 8 (4967) 72-19-11

**Яна Игоревна Обычная**  
студентка  
Финансовый университет  
при Правительстве РФ  
Адрес: 101100, Москва,  
Малый Златоустинский пер., д. 7, стр. 1  
E-mail: igorobynochnyu@mail.ru

#### Аннотация

В статье отмечена необходимость постоянного развития и модернизации военного образования. Актуальное направление модернизации образования – создание и развитие электронной информационной образовательной среды в военном вузе. Обозначена прямая связь между качеством военного образования и национальной безопасностью государства.

**Ключевые слова:** военное образование, военный вуз, электронная информационная образовательная среда, ЭИОС.

#### Summary

The article notes the need for continuous development and modernization of military education. The current direction of modernization of education is the creation and development of an electronic information educational environment in a military university.

**Keywords:** military education, military university, electronic information educational environment, EIEE.

Сложная военно-политическая обстановка, развернутая против России жестокая информационная и санкционная война, попытки втянуть страну в военное противостояние с другими государствами – все эти действия направлены на дестабилизацию в обществе, ослабление России и смену действующей власти. Все это требует принятия комплекса мер в обеспечении надежной национальной обороны.

Сложный и нестандартный характер задач, изменение принципов ведения боевых действий, тенденции гибридных войн, повышенные требования к эффективности управления человеческими ресурсами, предъявляют жесткие стандарты, и требует дальнейшего повышения качества подготовки офицерских кадров, как основы Вооруженных сил.

Министр обороны Российской Федерации генерал армии С.К. Шойгу выступая перед ру-

ководящим составом армии и флота в ходе оперативно-мобилизационного сбора руководящего состава Вооруженных сил, отмечал, что требования к командному составу повышаются: «Любое, даже малейшее замедление в развитии военных кадров сразу же негативно повлияет на боеспособность наших Вооруженных сил» [2].

Фундамент профессионализма офицеров закладывается в вузе. Устойчивый фундамент позволит «строить», растить специалиста в дальнейшем. Недостатки в подготовке офицерских кадров будут иметь негативное последствие для войск. Важно, чтобы из вузов выпускался офицер – профессионал по специальности, а также с высокой методической, строевой, физической подготовкой, владеющий различными приемами и способами обучения подчиненных. Под высокие и постоянно изменяющиеся требования к уровню подготовки современного офицера должна

## ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

адаптироваться и система военного образования.

Совершенствование системы военного образования является одной из приоритетных задач Министерства обороны и важнейшим направлением обеспечения обороноспособности и национальной безопасности Российской Федерации.

Цифровая эра требует другого подхода к организации обучения. Суть цифровой трансформации заключается в том, чтобы эффективно и гибко применить новейшие технологии для перехода к персонализированному и ориентированному на результат образовательному процессу. С этой целью в военных вузах идет работа по формированию электронной информационной образовательной среды (ЭИОС).

Ключевыми задачами ЭИОС военного вуза являются:

- доступ к учебным планам, рабочим программам дисциплин (модулей), практик, к изданиям электронных библиотечных систем и электронным образовательным ресурсам;
- фиксация хода образовательного процесса, результатов промежуточной аттестации и результатов освоения всех образовательных программ;
- проведение всех видов занятий, процедур оценки результатов обучения, реализация которых осуществляется с применением электронного обучения, дистанционных образовательных технологий;
- формирование электронного портфолио обучающегося, в том числе, сохранение работ обучающихся, рецензий и оценок этих работ со стороны любых участников образовательного процесса;
- взаимодействие между участниками образовательного процесса.

Основным требованием к ЭИОС выступает

автоматизация учебного процесса, настроенного на каждого обучающегося в отдельности с учетом его конкретных потребностей.

В то же время, для инновационного прорыва в области военного образования необходимо иметь грамотный преподавательский состав вуза, способный использовать все возможности ЭИОС. Здесь необходимо выделить наличие прямой связи цифровизации образования с уровнем освоения преподавателем военного вуза современных технологий. Отмечается необходимость формирования умения ориентироваться в потоке цифровой информации у педагогов, работать с ней, обрабатывать и встраивать в новую технологию [1].

Цифровизация военного образования требует от преподавателя грамотного применения информационных технологий и использование информационных ресурсов, что становится не только педагогической потребностью, но и педагогической необходимостью.

Военное образование во всем мире справедливо определяется как важная составляющая государственной безопасности. Высококвалифицированные военные кадры – та реальная сила, которая создает оборонный потенциал государства, его военную мощь.

### Литература

1. Исследование российского рынка онлайн-образования и образовательных технологий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://edmarket.digital/> (дата обращения 06.10.2021).
2. Шойгу С.К. Выступление на оперативно-мобилизационном сборе руководящего состава ВС РФ. 12.02.2019 г.



## TAMERON И МЕДИЦИНА ВМФ

На итоговом сборе руководящего состава медицинских служб ВМФ РФ вице-президенты МОУ «ИИФ» О.Н. Андрух и В.А. Грачёв представили доклад об основных инновационных разработках Института инженерной физики в интересах военной медицины ВМФ: о лекарственном препарате **TAMERON**, снаряжении и медицинском оборудовании с системой локального электрообогрева для обеспечения жизнедеятельности человека в условиях низких температур воды и окружающей среды, для несения службы и оказания помощи в экстремальных условиях.

В своем докладе они представили результаты использования ЛП **TAMERON**, в частности, в ООО «Медицинская клиника «АксиоМед». Клиника проводит гемосканирование – современный высокоэффективный метод тестирования капли крови, который позволяет оценить состояние форменных элементов крови, плазмы. С помощью гемосканирования можно получить информацию о качестве плазмы крови, состоянии эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов, наличие паразитов, болезнетворных бактерий, грибков, инфекций, вирусов, кристаллов сахара и холестерина, солей мочевой и ортофосфорной кислоты. Гемосканирование показывает состояние иммунитета, уровень насыщенности крови ферментами и микроэлементами, склонность к инсультам, инфарктам, онкологии, наличие дисбактериоза и проблем с внутренними органами.

После исследования составляется индивидуальная программа лечения препаратом **TAMERON**. Проводя диагностику до и после применения ЛП **TAMERON**, можно увидеть в реальном времени воздействие препарата на организм: как нормализуется рН клетки, как уходит протозойная инфекция, убираются соли мочевой кислоты, как лейкоциты начинают



активное действие. Если у пациента наблюдается сгущение крови и формирование тромбов, то при гемосканировании видно, как ЛП **TAMERON** разжижает кровь, убирает воспаление с общего кровотока, чистит плазму и создает условия для того, чтобы клетки работали в активном режиме.

Доклад вызвал интерес и активное обсуждение. Было отмечено, что лекарственный препарат **TAMERON** имеет огромный потенциал, и необходима большая и серьезная работа по его внедрению в клиническую практику медицинских служб ВМФ.





**Amelenkov Andrey A.** Candidate of Economic Sciences, Associate Professor research head FGBOU VO "MGLU" Address: 119034, Moscow, st. Ostozhenka, 38, building 1

**Antokhin Evgeny A.** Researcher FSBI «46 Central Research Institute» of the Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, Chukotsky passage, 10.

**Atakishchev Oleg I.** Doctor of Technical Sciences, professor. Deputy General Director for Special Projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Avdeeva Mariya M.** Junior researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Bezrodny Boris F.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Deputy Head of the Cybersecurity Center Joint stock company "Research and design Institute of Informatization, automation and communication in railway transport" (JSC "NIAS"). Head of the department "Applied mathematics" Moscow automobile and road construction state technical university (MADI). Moscow, Leningradsky Prospekt, 64.

**Chernousov Maxim S.** Adjunct. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Egorov Vladislav V.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Ermakov Artem M.** Candidate of biological sciences. Deputy Head of the Control Department pharmaceutical quality service. Institute of Engineering Physics. Senior Researcher Institute for Theoretical and Experimental Biophysics RAS. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Erunov Anatoly A.** Candidate of Technical Sciences, lecturer of the Department of networks and communication systems of space complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Fedorenko Yuri N.** Head of the Faculty, Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya str., 17.

**Gorlo Olga P.** Head of the Pharmaceutical Production Center. Physician-therapist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Grachev Dmitry V.** Head of the Laboratory of the Federal State Budgetary Institution «27 Central Research Institute» of the Ministry of Defense of Russia. Moscow, 1st Horoshevsky proezd, 5.

**Gribunin Vadim G.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Science. Chief Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Kazakov Rafael R.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Onboard Information and Measuring complexes of spacecraft. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Khizhnyak Evgeniy P.** Doctor of physical and mathematical sciences. Leading Researcher. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences. Moscow Region, Pushchino, ul. Institutskaya, 3.

**Khizhnyak Larisa N.** Candidate of Medical Sciences. Researcher. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences. Moscow Region, Pushchino, ul. Institutskaya, 3.

**Kondrashin Alexander E.** Candidate of Technical Sciences. Director of the Unified Sectoral Purchasing Center of JSC «Organization "AGAT"». Moscow, st. Butyrsky Val, 18, bldg. 1

**Kosyakov Evgeny N.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Professor, Department of Networks and Communication Systems, Space Complexes Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Krasnova Yulia V.** Candidate of Technical Sciences, Chief Technologist of Pharmaceutical Production. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Kvashennikov Vladislav V.** Doctor of Technical Sciences, the leading scientific employee Joint-stock company «The Kaluga scientific research institute Telemechanical devices». Kaluga, st. Karl Marx, 4.

**Labaznikov Andrey P.** Officer.

**Lesnykh Vadim N.** Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Levanov Denis V.** Adjunct of the Department of networks and communication systems of space complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Lyubimova Larisa V.** Leading engineer of the Cybersecurity Center Joint stock company "Research and design Institute of Informatization, automation and communication in railway transport" (JSC "NIAS"). Moscow, Nizhegorodskaya st., 27, bldg. 1.

**Makalov Alexey O.** Postgraduate of the Department of Devices and Biotechnical Systems, Tula State University. Tula, Lenin Avenue, 92.

**Mishin Dmitry Y.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Networks and Communication Systems of Space Complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Nakonechny Andrey B.** Officer.

**Nikitin Andrey K.** Software engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarnyuj l., 1a.

**Novikov Evgenij A.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. Head of the Department of Networks and Communication Systems of Space Complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.



## AUTHORS

**Obynochnaya Yana I.** Student. Financial University under the Government of the Russian Federation. Moscow, Maly Zlatoustinsky lane, 7, p. 1.

**Obynochny Igor A.** Candidate of Pedagogical Sciences, Deputy head of the Faculty – Head of the training unit. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Panchelyuga Mariya S.** Researcher. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Panchelyuga Victor A.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Senior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Parshina Elena N.** Head of testing laboratory. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Present Mikhail A.** Candidate of Chemical Sciences. Researcher Institute of Organic Chemistry named after N.D. Zelinsky. Moscow, Leninsky prospect, 47.

**Rudenko Edvard M.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Mathematics. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Rudnev Denis S.** General manager JSC «Stoletika». Moscow reg., Serpukhov, Moscow highway, 42, apt. 106.

**Ryumshin Konstantin Y.** Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher. FSBEI HE «MTUSI». Moscow, st. Aviamotornaya, 8a.

**Semikina Elena V.** Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Sergeev Viktor A.** Candidate of Technical Sciences, assistant professor. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Sevostyanov Andrey S.** Adjunct of the Department of Networks and Communication Systems of Space Complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Slatov Sergey V.** Adjunct. Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Smirnov Dmitriy V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, associate professor. Full member of the Academy of Engineering Sciences. Professor of the Department FSBEI of HE MAI (NRU). First Vice President of the Institute – Deputy Chairman of the Board of the Institute of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Smirnov Vladimir A.** Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of instrumentation and biotechnical Systems «PBS». Tula State University. Tula, Lenin Avenue, 92.

**Smurov Sergey V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor. First Vice President of the Institute – Chief Designer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Trofimov Ilya A.** Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Tzar'kov Alexey N.** Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Tzar'kova Elena A.** General manager Medical clinic «AxioMed». Moscow reg., Serpukhov, st. 2nd Moscow, 6, building 5, room 4A.

**Tsvetkov Kirill Yu.** Doctor of Technical Sciences, professor. Head of the department of networks and communication systems of space complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Umnikov Evgeny V.** Leading engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Volkov Gennadiy G.** Doctor of physical and mathematical sciences, professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Volsky Vladimir S.** Candidate of Chemical Sciences. Leading Researcher Department of Biomedical Research pharmaceutical manufacturing center. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Yakimova Irina A.** Candidate of Technical Sciences. Senior lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Zakharov Vladimir L.** Doctor of Military Sciences, professor. Full member of the Academy of Military Sciences. Professor. FSBEI of HE MAI (NRU). Moscow, Volokolamsk Highway, 4.

**Zelenevsky Vladimir V.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Zelenevsky Yury V.** Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

**Zhuravlev Alexey P.** Head of laboratory. FSBEI HE «MTUSI». Moscow, st. Aviamotornaya, 8a.

**Zinnurov Salavat H.** Candidate of Technical Sciences. Head of the laboratory of the Military Institute. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.



## ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

**Редактор в своей деятельности обязуется:**

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

### ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

**Решение о публикации.**

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

### Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

### ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

### Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

### Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

### ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

#### Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

#### Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

#### Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

#### Подтверждение источников.

Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

#### Авторство материала.

Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

#### Раскрытие информации и конфликт интересов.

Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

#### Ошибки в опубликованных работах.

Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность – незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издателю и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

### НАРУШЕНИЯ

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, без привлечения лиц, которые могут иметь конфликт интересов с одной из сторон.

Если материал, содержащий значительные неточности, был опубликован, он должен быть незамедлительно исправлен в форме, доступной для читателей и систем индексирования.

## ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

Тексты должны быть представлены:

- в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!

- на бумажном носителе формата А4.

Текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала (гарнитура «Times New Roman»), кегль 14.

**Простые символы и формулы не набирать в математическом редакторе!**

Напечатанный текст должен иметь поля: верхнее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см.

Вверху первой страницы статьи размещаются:

- рубрика журнала (см. Приложение 1);
- УДК;
- название статьи с переводом на английский язык;
- имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

Список литературы (Литература) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:

- список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):

- ФИО;
- ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;
- адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

**Обращаем особое внимание на:**

- точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);
- выверенность статьи в компьютерном наборе;
- полное соответствие файла на электронном носителе и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

#### Приложение 1

### РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА

«Известия Института инженерной физики»

#### Постоянные рубрики

- **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.**
- **Радиотехника и связь.**
- **Информатика, вычислительная техника и управление.**

#### Разовые рубрики

- **Техника специального назначения.**
- **Инновационные проекты.**
- **Техническое регулирование.**
- **Профессиональное образование.**
- **Искусственный интеллект и робототехника.**
- **Медицина и фармацевтика.**
- **Диагностические системы.**
- **Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.**

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.



## CONTENTS

### INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

Panchelyuga V.A., Panchelyuga M.S., Lesnykh V.N.

On the coincidence of the rotational periods of binary pulsars with periods in various processes fluctuations ..... 2

Smirnov V.A., Makalov A.O.

Some aspects of calculating the parameters of the input low-pass filter of an analog-to-digital converter ..... 6

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Kazakov R.R., Sergeev V.A.

Justification of the structure of a dual-use spacecraft in peacetime and wartime ..... 9

### RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Zelenevsky V.V., Chernousov M.S., Zelenevsky Y.V., Egorov V.V., Nakonechny A.B.

Mathematical model of a noise-resistant transmission system with the interleaving of code combinations and code compaction of data ..... 12

Ryumshin K.Y., Atakishchev O.I., Amelenkov A.A., Zhuravlev A.P.

Features of implementation of a block signal demodulator with square-amplitude modulation ..... 16

Tsvetkov K.Y., Erunov A.A., Levanov D.V.

Key generation for organization of hidden channel with adaptive code multiplexing ..... 20

Novikov E.A., Zinnurov S.H.

Simulation of the Pareto flow service process based on the application of hyperdelt approximation ..... 28

Kosyakov E.N., Mishin D.Y., Sevostyanov A.S., Kondrashin A.E.

The problem of choosing the moment of turning on the backup channel in case of a threat of overloading the direction of communication, taking into account the delay in control ..... 34

### INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

Zakharov V.L., Smirnov D.V., Trofimov I.A., Slatov S.V.

An approach to improving the mathematical model of the onboard system of a spacecraft ..... 41

Bezrodny B.F., Lyubimova L.V.

Optimization of the utilization of various protection options for the similar objects of automated control systems ..... 45

Gribunin V.G., Labaznikov A.P.

Parametric model of the work of the operator of an automated system with a manipulator of the «mouse» type ..... 48

Kvashennikov V.V.

Generalized cascade noise-tolerant codes in image recognition ..... 54

Volkov G.G., Smurov S.V.

On the exceptional peculiarities of multinar complex non-abelian algebras .... 60

Avdeeva M.M., Nikitin A.K., Khizhnyak L.N., Khizhnyak E.P., Yakimova I.A.

Therapy efficiency monitoring based on thermographic images ..... 69

Parshina E.N.

A method for assessing the compliance of information security tools such as a firewall with information security requirements based on indicators that have a non-numerical structure ..... 72

Rudenko E.M., Semikina E.V.

Intelligent monitoring of UAV group on eyler-hamilton reference graphs on the local ..... 75

Ryumshin K.Y., Atakishchev O.I., Amelenkov A.A.

Using the methods of clustering phase portraits in the processing of big data in accounting ..... 81

### MODERN MEDICINE AND PHARMACEUTICS

Ermakov A.M., Gorlo O.P., Krasnova Y.V., Volsky V.S., Present M.A., Tzar'kov A.N., Rudnev D.S.

Methods for the synthesis of 2,3-dihydro-5-nitro-1,4-phthalazinedione, as an intermediate product for the production of active pharmaceutical ingredients, 2,3-dihydro-5-nitro-1,4-phthalazinedione sodium (luminol sodium salt), the basis for drug TAMERON ..... 85

Ermakov A.M., Volsky V.S., Tzar'kova E.A.

On the discovery of luminol and luminol sodium salt, their crystalline forms and medicinal properties ..... 88

### ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS

Antokhin E.A., Atakishchev O.I., Umnikov E.V., Grachev D.V.

Problematic issues of the introduction of standardization and unification into the practice of the development and creation of robotic weapons ..... 93

### PROFESSIONAL EDUCATION

Obynochnyy I.A., Fedorenko Y.N., Obynochnaya Y.I.

Improving the military education system is the most important area of ensuring defense and national security ..... 98

### EVENTS

..... 100

### AUTHORS

..... 101

### THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS

..... 103

### REQUIREMENTS TO AUTHORS

..... 104

Учредитель и издатель – МОУ «ИИФ». Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Подписной индекс: 59190  
по каталогу «Урал-Пресс»

Адрес редакции: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.

Тел: +7(4967)35-31-93, 35-13-71

Факс: +7(4967)35-44-20 <http://www.iifrf.ru>

E-mail: [info@iifmail.ru](mailto:info@iifmail.ru)

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых

коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-26650 от 20 декабря 2006 г.

Отпечатано на полиграфической базе МОУ «ИИФ».

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.

Подписано в печать 16.12.2021.

Дата выхода в свет 20.12.2021. Тираж 2000 экз. Цена свободная.

© Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (ИИФ), 2021



Межрегиональное  
общественное  
учреждение

«Институт  
инженерной  
физики»

(МОУ «ИИФ»)

научное, образовательное  
и производственное  
учреждение