

№ 3<sup>+0</sup>  
2022 [65]

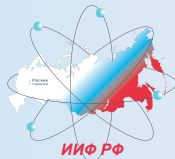
# ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал  
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



**ARMY**  
**2022**

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ  
ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР  
МЕЖДУНАРОДНОГО  
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОГО  
ФОРУМА «АРМИЯ-2022»



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

- 2 Панчелюга В.А., Лесных В.Н., Коломбет В.А.**  
О совпадении спектра периодов в флуктуациях процессов различной природы со спектрами некоторых астрофизических систем
- 7 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Бурмистров В.В., Макаров М.М.**  
К вопросу о возможности применения метода приближенного корректирующего оператора при наведении сервисного космического аппарата в условиях нештатной работы двигательной установки
- 12 Усик Б.А., Лучин А.В., Обычный И.А.**  
Выбор параметров для диагностирования преобразовательных устройств с резервированными элементами методами распознавания образов

**РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

- 15 Зеленецкий В.В., Черноусов М.С., Зеленецкий Ю.В., Егоров В.В., Наконечный А.Б.**  
Эффективность методов кодирования данных в системах радиосвязи
- 20 Атакищев О.И., Мухин А.И., Белихин Е.Н., Тонков А.С.**  
Радиомониторинговый метод оценивания самолетополюсов на аэродромах для обеспечения безопасного движения воздушных судов
- 24 Атакищев О.И., Белихин Е.Н., Мухин А.И., Павленко Д.П.**  
Исследование точностных характеристик орбитальной группировки наблюдения за космическими объектами триангуляционным методом

- 28 Афанасьев А.А., Любко А.Ю., Будяков А.В.**  
Использование полосовой дискретизации при квадратурной обработке сигналов в приемных модулях каналов радиомониторинга

- 31 Ремизов С.Л., Дежина Е.В., Черных Ю.С.**  
Сравнительный анализ методов идентификации передаточной функции дискретной цепи

- 36 Орехов С.Е., Орловский В.М.**  
Повышение пропускной способности перспективной интегрированной системы управления специального назначения на основе метода функционального сжатия двоичной информации

**ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И  
УПРАВЛЕНИЕ**

- 40 Захаров В.Л., Смирнов Д.В., Трофимов И.А., Крыжановский В.И.**  
Двухконтурная следящая система специализированного космического аппарата для наведения оптико-электронного прибора на космический объект
- 48 Квашенников В.В.**  
Эффективное кодирование образов в системах передачи и обработки информации

- 54 Вершинин В.Е.**  
Разработка рекуррентно-сверточной нейросетевой модели для оценки эмоциональной окраски текста

- 58 Мазин А.В., Ткаченко А.Л.**  
Моделирование распределения легирующих примесей в полупроводнике при различных значениях температуры и времени при термической диффузии

- 62 Чуринов В.В., Ефимако А.И., Чуринова О.В.**  
Оценка качества персонала, допускаемого к эксплуатации потенциально-опасных объектов

- 67 Суворов Г.П., Смирнов Д.В., Коробков А.А., Аллилуева Н.В.**  
Система видеомониторинга и аналитики пассажиропотока на основе методов искусственного интеллекта и сверточных нейронных сетей с реализацией на Python

- 75 Пушкарева Е.Ю., Пискулин И.В.**  
Кинематическая и динамическая модели системы автоматического управления движением робототехнического комплекса

- 79 Атакищев О.И., Грибунин В.Г., Ананьев В.Е., Лабазников А.П.**  
Методика непрерывной аутентификации оператора на основе анализа его действий с манипулятором типа «мышь»

- 86 Потапов С.Е., Попов В.А., Кондрашин А.Е.**  
Использование коллекции электронных текстов для повышения точности классификации документов в информационной системе специального назначения

- 90 Смуров С.В., Волков Г.Г.**  
Особенности геометрии квантового вакуума в расслоениях аффинных и торических проективных пространств

**ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И  
РОБОТОТЕХНИКА**

- 100 Бугаков И.А.**  
Настоящий искусственный интеллект в военном деле: Deep Learning + Deep Understanding

**НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ •  
НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ • ОТЗЫВЫ**

- 106 Новиков В.К., Рекунков И.С., Краснов М.Г.**  
Обобщенная модель информационно-психологических угроз (воздействий) на личный состав ВС РФ

**110 СОБЫТИЯ**

**111 AUTHORS**

**113 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

**114 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ  
СТАТЕЙ**

**Научно-технический журнал**

**ИЗВЕСТИЯ  
Института инженерной физики  
№3 (65) 2022**

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 АНО «ИИФ»,  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор

**Редакционный совет**

**Геннадий Иванович Азаров**  
главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИ 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  
ФГБУ НТИМИ,  
заслуженный деятель науки и техники РФ, 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

**Анатолий Васильевич Тодосийчук**  
главный советник аппарата Комитета ГД ФС РФ  
по образованию и науке,  
почетный работник науки и техники РФ,  
доктор экономических 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, доцент

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

**Владимир Владимирович Зеленовский**  
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



#### Дмитрий Вячеславович Смирнов

Первый Вице-президент АНО «ИИФ»  
почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, доцент  
действительный член АИН

#### Уважаемые коллеги! Дорогие друзья!

Мы гордимся тем, что, начиная с выставки «День инноваций Министерства обороны Российской Федерации», проведенной девять лет назад, в августе 2013 года, Институт инженерной физики является активным участником и официальным партнером всех важнейших конгрессно-выставочных мероприятий МО РФ. И в этом году, уже в восьмой раз подряд, с 15 по 21 августа 2022 года, АНО «ИИФ» примет участие в Международном военно-техническом форуме «Армия-2022», который традиционно пройдет в Конгрессно-выставочном центре Военно-патриотического парка культуры и отдыха ВС РФ «Патриот».

Наш Институт – инновационное предприятие оборонно-промышленного комплекса России. ИИФ выполняет научно-исследовательские, опытно-конструкторские работы, проводит исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники. Это – навигация и геодезическое обеспечение, военная медицина, физико-энергетические системы, прочностные исследования, автоматизированные системы управления и связи, информационная безопасность, сертификации программных комплексов, робототехника и многие другие. Ряд инновационных разработок Института не имеет мировых аналогов.

ИИФ является правообладателем ряда уникальных технологий, в том числе: информационно-коммуникационных (технологии производства программно-аппаратных комплексов, телекоммуникационного оборудования, средств защиты информации); технологий обеспечения безопасности и работоспособности человека (технологии производства автономных устройств пожаротушения; технологии производства автономных систем обеспечения микроклимата в подождежном пространстве); фармацевтических технологий (технологии производства особо чистого люминола и синтеза люминола натрия для изготовления экспрессных высокочувствительных систем хемилюминесцентного анализа; технологий производства активных фармацевтических субстанций; технологий производства лекарственных препаратов в различных лекарственных формах); и ряда других.

Институт включен в Реестр единственных поставщиков российских вооружения и военной техники, входит в Перечень системообразующих предприятий Московской области и России, получил сертификат участника Военного инновационного технополиса «ЭРА», что дает нам возможность продолжить научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую деятельность совместно с нашими коллегами из технополиса в интересах обеспечения обороноспособности нашего государства.

Для АНО «ИИФ» участие в Международном военно-техническом форуме «Армия-2022» – это возможность представить свои инновационные разработки руководителям силовых структур и ведомств, коллегам и партнерам, пообщаться с ведущими специалистами военных и гражданских отраслей, обменяться опытом и мнениями по перспективным конструкторским решениям, новейшим технологиям и их практическому применению, обрести новых партнеров и заказчиков.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

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

## О СОВПАДЕНИИ СПЕКТРА ПЕРИОДОВ В ФЛУКТУАЦИЯХ ПРОЦЕССОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ СО СПЕКТРАМИ НЕКОТОРЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## ON COINCIDENCE OF PERIODS SPECTRUM IN FLUCTUATIONS OF VARIOUS NATURE PROCESSES WITH THE SPECTRA OF SOME ASTROPHYSICAL SYSTEMS

**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

**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

**Валерий Александрович Коломбет**  
кандидат физико-математических наук  
заведующий лабораторией  
Институт теоретической и  
экспериментальной биофизики РАН  
Адрес: 142290, Московская обл., г. Пущино,  
ул. Институтская, д. 3  
Тел.: +7(4967)73-92-62  
E-mail: v.kolombet@rambler.ru

### Аннотация

В работе исследуется связь универсального спектра периодов, обнаруженного в флуктуациях процессов различной природы со спектрами ряда астрофизических систем: вращательными периодами астероидов, периодами двойных релятивистских систем, периодами, найденными в спектрах астрофизических мазеров. Существование данного спектра на столь различных масштабах – от земных до астрономических, может свидетельствовать о его глобальной, космофизической природе.

**Ключевые слова:** универсальный спектр периодов, флуктуации, вращательные периоды астероидов, периоды двойных релятивистских систем, астрофизические мазеры.

### Summary

The paper investigates relationship of the Universal Spectrum of Periods (USP) found in fluctuations of various nature processes with the spectra of some astrophysical systems: rotational periods of asteroids, periods of binary stars systems, and the periods found in the spectra of astrophysical masers. The existence of USP-spectrum on such different scales – from terrestrial to astronomical, may indicate its global, cosmophysical nature.

**Keyword:** universal spectrum of periods, fluctuations, rotational periods of asteroids, periods of binary stars systems, astrophysical masers.

### Введение

В работе [1] был разработан локальный фрактальный анализ шумоподобных временных рядов, позволивший найти устойчивый спектр периодов в многолетних временных рядах флуктуаций скорости альфа-распада [2]. Было показано [2], что большинство периодов из найденного спектра совпадает с периодами собственных колебаний Земли [3]. В дальнейшем был обнаружен его универсальный характер: периоды, найденные во временных рядах флуктуаций в процессах различной природы совпадали с соответствующей частью данного спектра. Даль-

нейшие исследования позволили уточнить ряд периодов, а также выявить новые, в том числе, не принадлежащие спектру собственных колебаний Земли [4]. В силу его универсального характера данный спектр был назван «универсальный спектр периодов» (УСП).

Наряду с совпадением УСП [2,4] со спектрами различных флуктуационных процессов «земного» происхождения, чрезвычайно интересными являются подобные совпадения со спектрами периодов, найденными для «внеземных», астрофизических процессов. В настоящей работе будут рассмотрены совпадения УСП с вращательными

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

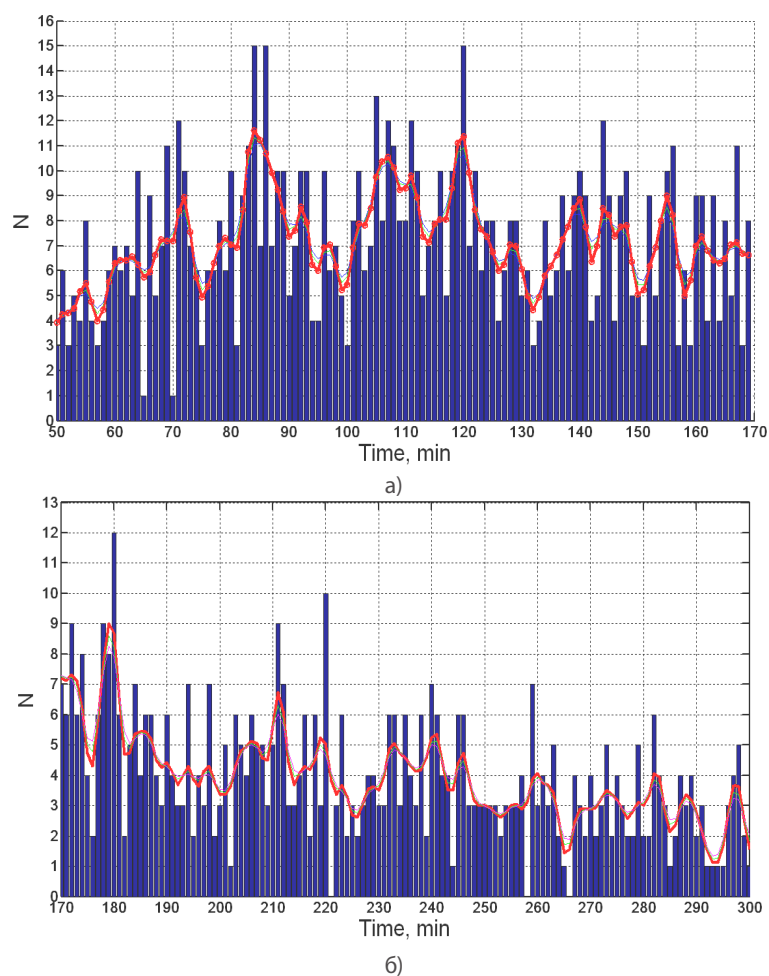
периодами астероидов, периодами двойных релятивистских систем [5] и периодами, найденными в спектрах астрофизических мазеров.

### Вращательные периоды астероидов

На *рисунке 1* приведена гистограмма, показывающая частоты встречаемости вращательных периодов астероидов (синие столбцы). Эта гистограмма впервые построена в [6] на основе данных, содержащихся в параметрах кривых блеска малых планет [7]. После четырехкратного сглаживания процедурой скользящего среднего с использованием пуассоновского треугольного окна была получена кривая, показанная на *рисунке 1* красной линией. Видно, что некоторые частоты, соответствующие максимумам сглаженного распределения встречаются в разы чаще остальных. Периоды, соответствующие максимумам данной кривой приведены в первом столбце *таблицы 1*. В пятом и шестом столбцах *таблицы 1* даны периоды УСП. В пятом столбце приведены периоды, найденные во временных рядах флуктуаций температуры мелких млеко-

питающих (ФТЖ), в шестом – во временных рядах флуктуаций скорости альфа-распада (Р/Р).

Как следует из сравнения значений периодов в столбцах № 1 и № 5-6 *таблицы 1* спектр вращательных периодов астероидов совпадает с УСП в пределах точности его определения ( $\pm 1$  мин). Можно отметить несколько худшее совпадение периодов, соответствующих распределению, приведенному на *рисунке 1б*), что может быть связано с недостаточно большим числом периодов астероидов, соответствующих одному бину результирующего распределения. Совпадение вращательных периодов астероидов (*рисунк 1*) с УСП-периодами наглядно демонстрирует *рисунк 2*. Здесь синие столбцы соответствуют нормированной частоте встречаемости пиков на спектрах флуктуаций температуры мелких млекопитающих и птиц (столбец №5 *таблицы 1*). Красные столбцы на *рисунке 2* соответствуют экстремумам в распределении вращательных периодов астероидов (столбец №1 *таблицы 1*). Оранжевые – ближайшим экстремумам на распределении частоты встречаемости периодов (синие столбцы)



**Рис. 1.** Распределение вращательных периодов астероидов (синие столбцы) [6], полученное на основе данных [7]. Красная линия – сглаженное распределение

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

на спектрах флуктуаций температуры мелких млекопитающих и птиц. Видно, что практически все пики с  $p > 0.5-0.6$  являются окрашенными, т.е. «резонансные» периоды астероидов совпадают с наиболее вероятными значениями периодов на суммарных кросскорреляционных спектрах флуктуаций температуры мелких млекопитающих и птиц. При этом 86% совпадений можно считать точными, т.к. они не превышают точность определения УСП-периодов ( $\pm 1$  мин) остальные 14% находятся в пределах ( $\pm 2$  мин).

В то время как в отношении «земных» УСП-периодов возможна дискуссия о том не являются ли они следствием некоторых неучтенных геофизических влияний, то распределение вращательных периодов астероидов, рассмотренное в настоящей работе, на наш взгляд, от такого рода влияний не зависит.

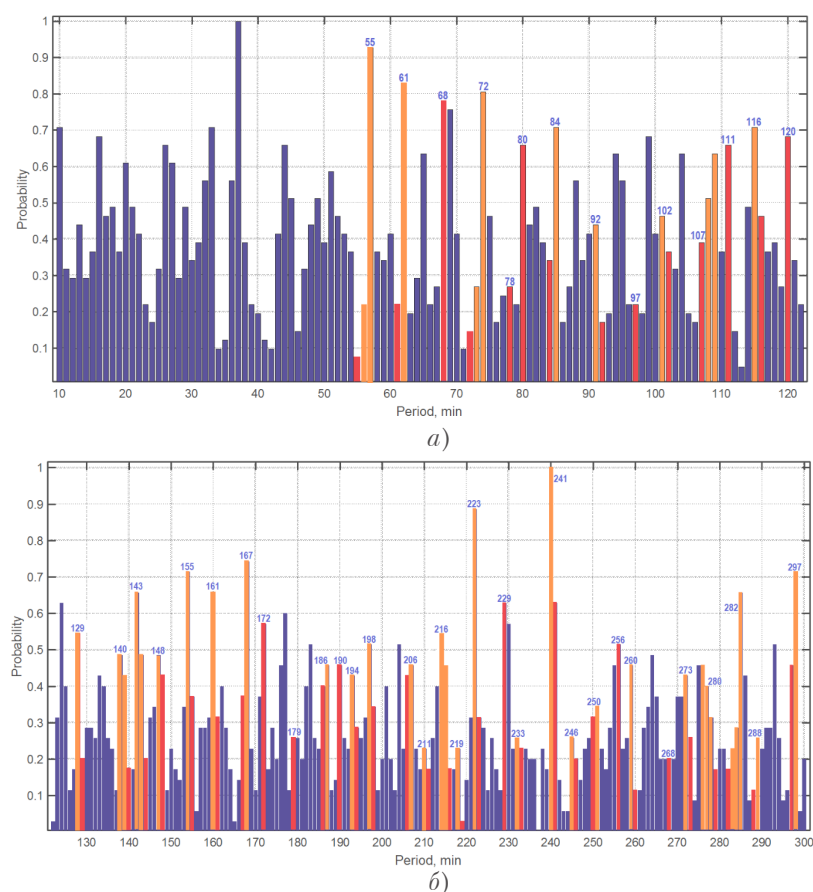
### Периоды в спектрах астрофизических мазеров

В [9] суммированы экспериментальные работы, инициированные большим циклом теоретических исследований [10-12] в которых было показано, что гравитационно-волновое излучение короткопериодных двойных звезд, находящихся в окрест-

ности астрофизического мазера может модулировать (используя механизм оптико-метрического параметрического резонанса [10-12]) интенсивность отдельных компонент в его спектре. Авторы [9] утверждают, что наблюдаемая модуляция не является следствием экспериментальных ошибок, погодных условий или нестабильности межзвездной среды. В работе [9] определены более четырех десятков периодов, которые, преимущественно, лежат в диапазоне десятков минут. Полученные в [9] экспериментальные результаты суммированы во втором и третьем столбцах *таблицы 1*.

Как следует из *таблицы 1* с учетом отмеченной выше точности определения УСП-периодов ( $\pm 1$  мин) мы можем говорить о соответствии ОМПР- и УСП-периодов.

Периоды, величина которых близка к приведенным значениям ОМПР-периодов, найдены также в АЕ-индексе геомагнитной активности [13], а также в сантиметровом радиоизлучении Солнца [14]. В силу этого, перед нами две альтернативы. Первая предполагает, что периоды, найденные в [9] имеют земное происхождение и связаны с некоторым неучтенным влиянием на приемную аппаратуру. Источниками такого влияния могли бы быть, например, упомянутые



**Рис. 2.** Вероятность появления периодов во временных рядах флуктуаций температуры мелких млекопитающих и птиц (синие столбцы) и экстремумы сглаженного распределения вращательных периодов астероидов (красные столбцы)

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

выше флуктуации геомагнитных полей [13-14] или механические движения приемной антенны за счет СКЗ [3,8] и т.п. Необходимо отметить, что авторский анализ подобных влияний, проведенный в [15], отрицает возможность их воздействия на результаты, впервые описанные в [9].

Вторая альтернатива основана на предположении, что найденные в [9] периоды «зарождаются» в месте нахождения астрофизического мазера – имеют космическое происхождение. В таком случае мы наблюдаем некоторую глобальную ритмику масштабы которой, возможно, сравнимы с масштабами Вселенной. Следствием этой ритмики должно быть совпадение УСП-периодов с периодами двойных звездных систем, которые, согласно [10-12], модулируют излучение астрофизических мазеров.

### Вращательные периоды двойных звездных систем

Проверка высказанного выше предположения о совпадении вращательных периодов двойных звездных систем (ДЗС) с УСП- и, как следствие, с ОМПР-периодами была выполнена в работе [5]. В этой работе использовался каталог, обычно используемый в серии работ Л.В. Грунковой [16], которая ранее показала наличие орбитальных периодов ДЗС в спектрах временных рядов инфранизкочастотных вариаций вертикальной составляющей электрического поля в пограничном слое атмосферы Земли.

В столбце №4 *таблицы 1* приведены значения орбитальных периодов ДЗС из означенного выше каталога. Сравнение данных столбцов №4 и №5-6 *таблицы 1* показывает их совпадение с точностью 2 мин.

**Таблица 1**

Сводная таблица периодов. ВПА – вращательные периоды астероидов, ОМПР – периоды, найденные в спектрах астрофизических мазеров [9], ДЗС – двойные звездные системы [5], ФТЖ – флуктуации температуры животных, Р/Р – периоды в флуктуациях скорости радиоактивного распада [2]

№	ВПА	ОМПР (I)	ОМПР (II)	ДЗС	УСП	
					ФТЖ	Р/Р
	1	2	3	4	5	6
1		14.58			13	13.8
2		21.6; 23			20	21.3
3						25
4					26	27.5
5					33	32
6					37	40
7			44		44	43
8		46.06	46			46
9		50.64			51	51
10						
11	55				57	55.8
12	61	62.91	62-63		62	60.7
13	68	67.63	68		68	68.3
14	72					73
15	78				74	75.5
16	80	81.64			80	80
17	84		83-84		85	85.5
18	92; 97		93-94	95.33	94	95
19	102			102.37	101	99.8
20	107			108.93	109	106.3
21	111		110		111	112.3
22	116				115	
23	120				120	
24	124			125.28	124	125
25	129				128	
26	140				138	
27	143		143- 144	142.72	142	141
28	148			147.24	147	

№	ВПА	ОМПР (I)	ОМПР (II)	ДЗС	УСП	
					ФТЖ	Р/Р
	1	2	3	4	5	6
29	155				156	
30	161				162	
31	167				166	
32	172			173.76	172	172
33	179				177	
34	186				187	
35	190			191.52	190	190
36	194			195.8	193	196
37	198				197	
38				203.03	204	203
39	206			208.15	207	207
40	211			211.97	210	
41	216				214	
42	219				218	
43	223				222	
44	229			230.4	229	230
45	233				232	
46	241				240	
47	246				245	
48	250			250.55	251	252
49	256			254.3	256	256
50	260				259	
51	268				264	
52	273			273.6	272	272
53	279				280	
54	282			284.62	285	283
55	288			288	289	
56	297				298	

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

В свете обсуждавшейся выше второй альтернативы, это может свидетельствовать о том, что результаты работы [9] действительно обусловлены гравитационно-волновым излучением ДЗС, а не тривиальными геофизическими причинами.

### Заключение

Приведенные выше результаты позволяют предположить существование глобальной ритмики, увязывающей как земные, так и астрофизические процессы. Ее проявлением является УСП. В настоящее время существуют немногочисленные работы, утверждающие наличие подобной ритмики в масштабах Солнечной системы. Например, в [17] говорится «... о солнечной системе как системе синергетической, где в процессе длительной эволюции сформировался единый колебательный режим движения. Этому режиму отвечает универсальный Спектр Периодов Солнечной Системы. Он простирается от циклов большой длительности (тысячелетия) до микроритмов с периодами порядка минут» [17].

Также существуют единичные работы как, например, [18] в которой исследовались геологические, биологические и астрономические циклы с периодичностью от 57.3 г. до 1.64 млрд. лет. Авторы [18] рассматривают эти циклы как универсальные, т.к. внеземные периоды (квазары, звездообразование) соизмеримы с земными периодами (вулканизм, картины вымирания, генетическое развитие). Суммарно рассматриваемые периоды формируют самоподобную универсальную шкалу. Большинство этих циклов появляется и исчезает в унисон – они синхронизированы между собой. В серии работ, суммированных в [19] показано что эта шкала может быть продолжена в область малых периодов, вплоть до оптических частот, составляя, по крайней мере, 30 десятичных порядков.

Картина, возникающая на основе рассмотренных работ, с одной стороны, хорошо согласуется со свойством универсальности УСП-спектра, а с другой – объясняет наблюдаемое совпадение ОМПР- и МВС-спектров.

### Литература

1. Панчелюга В.А., Панчелюга М.С. Фрактальная размерность и гистограмный метод: методика и некоторые предварительные результаты анализа шумоподобных временных рядов // Биофизика, 2013. Т.58. Вып. 2. С. 377-384.
2. 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.
3. Masters T.G., Widmer R. In Free oscillations: frequencies and attenuations. Ed. by T.J. Ahrens (American Geophysical Union, 1995). Pp. 104-125.
4. Панчелюга В.А., Владимирский Б.М., Панчелюга М.С. и др. Сб. трудов XXI Всерос. конф. «Солнечная и солнечно-земная физика-2017». С.261-264.
5. Панчелюга В.А., Панчелюга М.С., Лесных В.Н. О совпадении вращательных периодов двойных звездных систем с периодами в флуктуациях процессов различной природы // Известия института инженерной физики, 2021. №4(62). С.2-5.
6. Панкратов А.К., Нарманский В.Я., Владимирский Б.М. Резонансные свойства Солнечной системы, солнечная активность и вопросы солнечно-земных связей. Симферополь: «Гелиоритм», 1996. 77 с.
7. Эфемериды малых планет, 1994.
8. Баркин Ю.В. Свободные трансляционные колебания системы «ядро-мантия» Земли и вариации природных процессов с часовыми периодами // Нелинейный мир, 2007. №1-2. Т.5. С.101-110.
9. Siparov S., Samodurov V., Laptev G. Origin of observed periodic components in astrophysical masers' spectra // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 467, Issue 3. Pp. 2813-2819.
10. Siparov S. Low-frequency external force acting on an atom in a resonant field // Phys. Rev. A, 1997, 55, 3704.
11. Siparov S. A two-level atom in the field of a gravitational wave – on the possibility of parametric resonance // Astronomy and Astrophysics, 2004. Vol. 416. No. 3. Pp. 815-824.
12. Siparov S. Introduction to the Anisotropic Geometrodynamics. Singapore, World Scientific Press, 2011.
13. Бобова В.П. и др. Возможное совпадение периодов солнечных осцилляций с собственными периодами колебаний Земли // Кинематика и физика небесных тел, 1991. Т.7. №1. С.34-42.
14. Цветков Л.И. Колебания в радиоизлучении спокойного Солнца на волне 2.25 см // Известия КРАО, 1986. Т.75. С.77-85.
15. Сипаров С.В. Анизотропная геометродинамика: галактический тест – состояние вопроса // Метафизика, 2020. №4. С.147-165.
16. 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.
17. Владимирский Б.М., Нарманский В.Я., Темурьянц Н.А. Космические ритмы. Симферополь, 1994. 176с.
18. Puetz S.J. et al. Evidence of synchronous, decadal to billion-year cycles in geological, genetic, and astronomical events // Chaos, Solitons & Fractal, 2014. No.62-63. Pp.55-75.
19. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Панчелюга В.А. Универсальная система утраивающихся периодов // Метафизика, 2021. №4. С. 98-106.



# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 629.76

**К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ  
ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА  
ПРИБЛИЖЕННОГО  
КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ОПЕРАТОРА  
ПРИ НАВЕДЕНИИ СЕРВИСНОГО  
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В  
УСЛОВИЯХ НЕШТАТНОЙ РАБОТЫ  
ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ**

**ON THE QUESTION OF THE  
POSSIBILITY OF USING THE  
METHOD OF AN APPROXIMATE  
CORRECTIVE OPERATOR WHEN  
POINTING A SERVICE SPACECRAFT  
IN THE CONDITIONS IF ABNORMAL  
OPERATION OF THE PROPULSION  
SYSTEM**

**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  
АНО «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: dv\_smr@iifmail.ru

**Владимир Владимирович Бурмистров**  
*кандидат технических наук*  
преподаватель кафедры автономных систем управления  
ВКА им. А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13  
Тел. 8 (812) 347-95-21

**Михаил Михайлович Макаров**  
*кандидат технических наук*  
начальник лаборатории – старший научный сотрудник  
ВИ (НИ) ВКА им. А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13  
Тел. 8 (812) 347-95-21

## Аннотация

Предложен алгоритм итерационного терминального управления для участка дальнего наведения сервисного космического аппарата (КА) на основе метода приближенного корректирующего оператора (МПКО). Рассмотрена нештатная ситуация, заключающаяся в отклонении величины силы тяги двигательной установки сервисного КА от расчетной в меньшую сторону. Приведены результаты расчетов продолжительности активного участка траектории для двух вариантов силы тяги двигательной установки сервисного КА. Сделаны выводы о возможности применения предложенного алгоритма для достижения установленной точности наведения при нештатной работе двигательной установки

**Ключевые слова:** сервисный космический аппарат, итерационное терминальное управление, точность выведения.

## Summary

An algorithm of interative terminal control for the long-range guidance section of a service spacecraft based on the method of an approximate correcting operator is proposed. An abnormal situation is considered, consisting in a deviation of the magnitude of the thrust force of the propulsion system of the service spacecraft from the calculated one in a smaller direction. The results of the duration of the active section of the trajectory for two variants of the thrust force of the propulsion system of the service spacecraft are presented. Conclusions are drawn about the possibility of using the proposed algorithm to the achieve the established accuracy of guidance during abnormal operation of the propulsion system

**Keywords:** service spacecraft, the iteration terminal control, output accuracy.

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

### Введение

Современные программы совершенствования космической техники связаны с разработкой маневрирующих сервисных космических аппаратов, действующих автономно и оснащенных соответствующей целевой бортовой аппаратурой, применение которых предполагает сближение с орбитальным объектом (ОО). Для этого важно рассматривать вопросы разработки автономных систем управления сервисных КА и их алгоритмического обеспечения. Использование сервисных КА, с новыми алгоритмами управления позволит разрешить ряд типовых проблемных ситуаций:

- дистанционный диагностический осмотр КА с целью установления его технического состояния, режима функционирования, наличия внешних повреждений;
- выявление среди орбитальных объектов крупного космического мусора, представляющего опасность для орбитальных группировок действующих КА, стыковка с ним и увод с орбиты;
- техническое обслуживание КА последнего поколения (заправка топливом, замена аккумуляторных батарей и т.д.).

В процессе орбитального полета космические аппараты подвергаются значительному количеству как внешних возмущений, так и деградации элементов систем управления. К ним относятся погрешности измерительных приборов и систем, возмущающие факторы космического пространства. Наряду с этим возможны отказы исполнительных систем, которые отрицательным образом будут влиять на выполнение целевой задачи. В данной статье рассмотрен вопрос обеспечения требуемой точности решения задачи наведения сервисного КА на ОО при снижении силы тяги ДУ с номинального значения на 20%.

### Метод приближенного корректирующего оператора при наведении сервисного космического аппарата в условиях нештатных ситуаций

Рассмотрим ситуацию, при которой сервисный КА должен провести дистанционный диагностический осмотр неисправного КА, совершающего неуправляемый полет и не реагирующего на команды наземного комплекса управления, а затем произвести стыковку с ним с целью увода на орбиту захоронения. Данная задача с точки зрения управления движением центра масс КА является одной разновидностей сближения в космосе. Траектория сближения сервисного КА с аварийным КА делится на два этапа: дальнего и ближнего наведения. В статье предлагается рассмотреть возможность приме-

нения метода приближенного корректирующего оператора при наведении сервисного космического аппарата в условиях нештатной работы двигательной установки. Этапом дальнего наведения является такой участок траектории сближения с аварийным КА, при котором сервисный КА переходит с дежурной орбиты в некоторую область пространства, определяемую соответствующим вектором координат  $R_{зад}$ , который рассчитывается наземным комплексом управления с учетом нахождения в этой области космического пространства аварийного КА в момент прибытия сервисного КА. Таким образом, вероятность успешного выполнения этапа дальнего наведения зависит не только от точности выведения сервисного КА, но также и от выполнения маневра строго за заданное время, так как для начала этапа ближнего наведения сервисного КА должен оказаться в расчетное время в заданной точке пространства (окрестность аварийного КА) для дальнейшего поиска и захвата аварийного КА бортовыми средствами наведения.

В момент начала маневра  $T_{см}$  сервисного КА находится на дежурной орбите в точке, определяемой вектором координат  $R_0$  и вектором скорости  $V_0$ . В качестве целеуказания от наземного комплекса управления поступают следующие исходные данные: вектор координат точки прицеливания  $R_{зад}$ , время старта  $T_{см}$  и время на проведение этапа дальнего наведения  $T_{зад}$ . Схема орбитального перехода сервисного КА в окрестность аварийного КА состоит из активного и пассивного участков траектории (АУТ и ПУТ). В целях обеспечения требуемой точности наведения сервисного КА предлагается использовать в составе программно-математического обеспечения бортовой системы управления сервисного КА алгоритм расчета параметров программы управления, позволяющий по текущим навигационным данным определять длительность АУТ  $T_{аут}$  и вектор направляющих косинусов  $\alpha$  ориентации силы тяги двигательной установки (ДУ), которые обеспечивают попадание в заданную точку прицеливания с координатами  $R_{зад}$  за заданное время  $T_{зад}$ . Такие алгоритмы, рассмотренные подробно в [1-4], реализуют терминальное управление движением центра масс сервисного КА. К основным достоинствам данного метода управления движением следует отнести высокую точность наведения, оперативность расчета параметров управления, а также устойчивость к возмущающим воздействиям.

На этапе дальнего наведения задача управления движением сервисного КА заключается в его переводе из начального состояния  $R_0, V_0$  в требуемое конечное состояние  $R_{зад}$  за заданное время  $T_{зад}$ .

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

Уравнения движения сервисного КА имеют следующий вид

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{R}} = \mathbf{V}; \\ \dot{\mathbf{V}} = \mathbf{g}(\mathbf{R}, t) + \mathbf{u}(t), \quad t \in [T_{\text{ст}}, T_{\text{зад}}]; \end{cases}$$

где  $u(t)$  – вектор управляющего ускорения;  
 $g(R, t)$  – гравитационное ускорение, соответствующее принятой модели гравитационного поля Земли (ГПЗ).

Вектор управляющего ускорения определяется через параметры ДУ и направляющие косинусы ориентации вектора тяги следующим выражением

$$\mathbf{u}(t) = \frac{c\beta}{1-\beta t} \cdot \boldsymbol{\alpha},$$

где

$$\beta = \begin{cases} \beta_{\text{зад}} & \text{при } t \in [T_{\text{ст}}, T_{\text{аут}}]; \\ 0 & \text{при } t \in [T_{\text{аут}}, T_{\text{зад}}]. \end{cases}$$

$$\mathbf{R} = (X, Y, Z)^T, \quad \mathbf{V} = (V_X, V_Y, V_Z)^T, \quad \boldsymbol{\alpha} = (\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z)^T = \text{const.}$$

В этих соотношениях

$c$  – скорость истечения газов;

$\beta = \frac{\dot{m}}{m_0}$  – относительный секундный расход топлива,

$\dot{m}$  – секундный расход массы топлива.

$m_0$  – начальная масса сервисного КА.

$T_{\text{аут}}$  – продолжительность АУТ сервисного КА;

$\boldsymbol{\alpha}$  – вектор направляющих косинусов ориентации силы тяги ДУ сервисного КА.

Требуется найти вектор параметров управления

$$\mathbf{u} = (T_{\text{аут}}, \alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z); \quad \boldsymbol{\alpha}^T \cdot \boldsymbol{\alpha} = 1;$$

путем решения краевого уравнения

$$\mathbf{R}_{\text{зад}} = \mathbf{R}[\mathbf{R}_0, \mathbf{V}_0, T, \mathbf{u}].$$

При терминальном управлении крайевая задача нахождения вектора параметров управления решается в полете многократно, поэтому для ее оперативного и своевременного решения необходимо использовать соответствующие методы. В работах [1,2,4] предложен конструктивный метод решения краевых задач и нелинейных уравнений – метод приближенного корректирующего оператора (МПКО), который позволяет использовать возможные упрощенные алгоритмы приближенного расчета в схеме численного поиска точного решения полной задачи. Такой подход расширяет конструктивный базис синтеза быстродействующих алгоритмов решения указанных краевых задач и нелинейных уравнений.

Применительно к условиям рассматриваемой задачи вычислительная схема МПКО принимает следующий вид

$$\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{M} \left[ \sum_{i=1}^k \mathbf{S}(\mathbf{u}_i) \right], \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

где  $\mathbf{M}(\cdot)$  – приближенный корректирующий оператор, выражающий алгоритм приближенного решения задачи управления;

$\mathbf{S}(\mathbf{u}_k)$  – промах в  $k$ -й итерации.

В условиях рассматриваемой задачи в состав вектора определяемых параметров входят продолжительность АУТ  $T_{\text{аут}}$ , и вектор направляющих косинусов тяги  $\boldsymbol{\alpha}_{\text{аут}}$ .

Промах в  $k$ -й итерации определяется по формуле

$$\mathbf{S}(\mathbf{u}_k) = \mathbf{R}[\mathbf{R}_0, \mathbf{V}_0, T, \mathbf{u}] - \mathbf{R}_{\text{зад}}$$

Для применения МПКО необходимо сформировать приближенный корректирующий оператор  $\mathbf{M}(\cdot)$ , выражающий алгоритм приближенного решения задачи. В интересах решения поставленной задачи в состав приближенного корректирующего оператора  $\mathbf{M}(\cdot)$  включим следующие алгоритмы:

1. Алгоритм расчета импульсной программы управления сервисного КА в центральном ГПЗ за заданное время (метод Эйлера-Ламберта)

$$\Delta \mathbf{V} = \Delta \mathbf{V}(\mathbf{R}_0, \mathbf{V}_0, \mathbf{R}_{\text{зад}}, T_{\text{зад}}) \quad [1,2,3].$$

2. Алгоритм расчета параметров управления:

$$\begin{aligned} T_{\text{аут}} &= \frac{1}{\beta} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta V}{c}} \right); \\ \boldsymbol{\alpha}_{\text{аут}} &= \frac{\Delta \mathbf{V}}{\Delta V}. \end{aligned}$$

В соответствии с изложенным выше, общую вычислительную схему решения рассматриваемой задачи МПКО, можно представить следующим образом:

1. По заданным  $\mathbf{R}_0, \mathbf{V}_0, \mathbf{R}_{\text{зад}}, T_{\text{зад}}$  и формулам импульсного корректирующего оператора производится расчет  $\Delta V$  и параметров АУТ КА-Р  $T_{\text{аут}}, \boldsymbol{\alpha}_{\text{аут}}$ .

2. Интегрирование уравнений управляемого движения сервисного КА на АУТ и ПУТ в нормальном ГПЗ с учетом протяженности по времени исполнения расчетных импульсов скорости, так как приращение скорости сервисного КА происходит не мгновенно:

– АУТ – ;  $t \in [T_{\text{ст}}, T_{\text{аут}}], \mathbf{u} = \mathbf{u}_k, k = 1, 2, \dots$

– ПУТ –  $t \in [T_{\text{аут}}, T_{\text{зад}}], \mathbf{u} = 0.$

3. Определение новой смещенной точки прицеливания и расчет уточненных значений параметров управления по алгоритму МПКО (пункт 1).

4. Далее вычисления повторяются, начиная с п.2, пока не будет обеспечена требуемая точность расчетов:

$$|\mathbf{S}(\mathbf{u}_k)|_i \leq \Delta R_{\text{зад}},$$

где  $\Delta R_{\text{зад}}$  – требуемая точность расчета программы управления, характеризующая методическую точность попадания в заданную точку прицеливания.

Приведем некоторые результаты расчетов продолжительности активного участка траек-

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

тории  $T_{\text{аут}}$  для следующего набора исходных данных: высота орбиты сервисного КА – 500 км; высота орбиты аварийного КА – 1000 км; наклонение орбит сервисного КА и аварийного КА –  $60^\circ$ ; угловая дальность до аварийного КА изменялась в диапазоне  $[140-220^\circ]$ ;  $c=3000$  м/с;  $\beta=0,00075$ ;  $T_{\text{зад}}$  изменялось в диапазоне  $[2300-3700]$ ,  $\Delta R_{\text{зад}}=100$  м.

На *рисунке 1* представлен график продолжительности активного участка траектории от угловой дальности до аварийного КА.

Затраты характеристической скорости для совершения маневра отражены на *рисунке 2*.

Одним из достоинств методов управления движением КА, основанных на принципах терминального наведения, является устойчивость

к нерасчетным возмущающим воздействиям. В рамках данной статьи рассмотрим следующую нештатную ситуацию. Предположим, что во время выполнения маневра перелета в окрестность аварийного КА сила тяги двигательной установки сервисного КА ( $P_{\text{дв}}$ ) уменьшилась до 80% от расчетной ( $P_{\text{дв.р.}}$ ). В случае применения для управления движением центра масс КА методов жесткого программирования такое возмущающее воздействие приведет к неизбежному промаху, и, как следствие, к срыву выполнения целевой задачи сервисного КА. Исходные данные при моделировании оставлены прежними, в том числе время  $T_{\text{зад}}$  выполнения маневра для каждой из угловых дальностей, так как это одно из ключевых условий успешного выполнения целевой задачи.

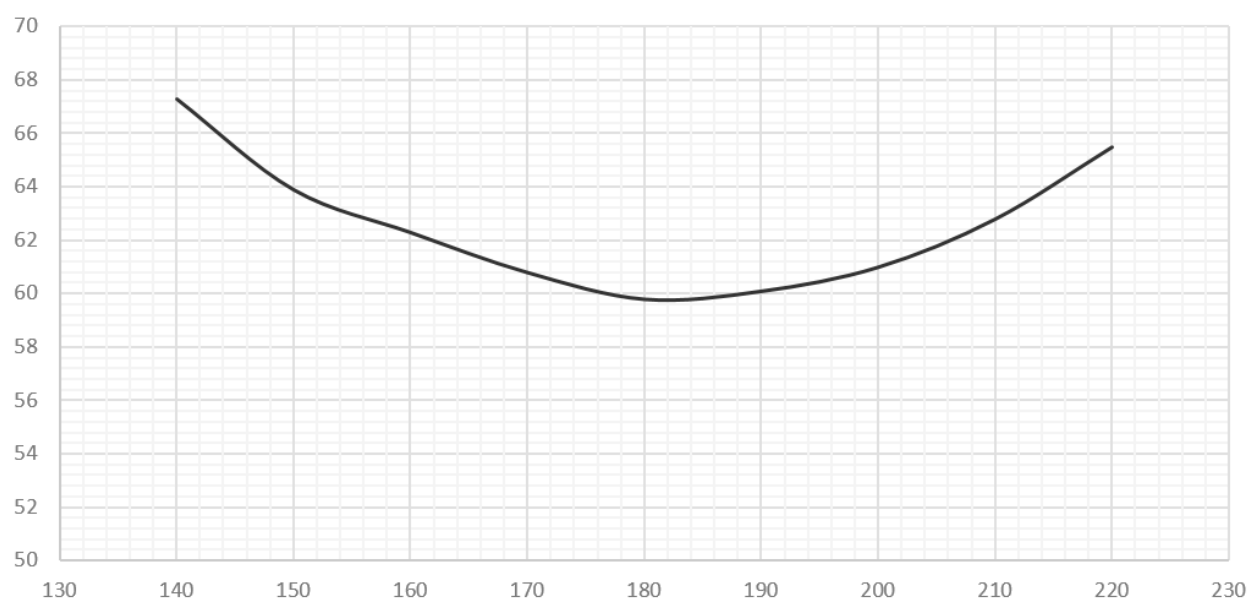


Рис. 1. Продолжительность АУТ от угловой дальности до аварийного КА

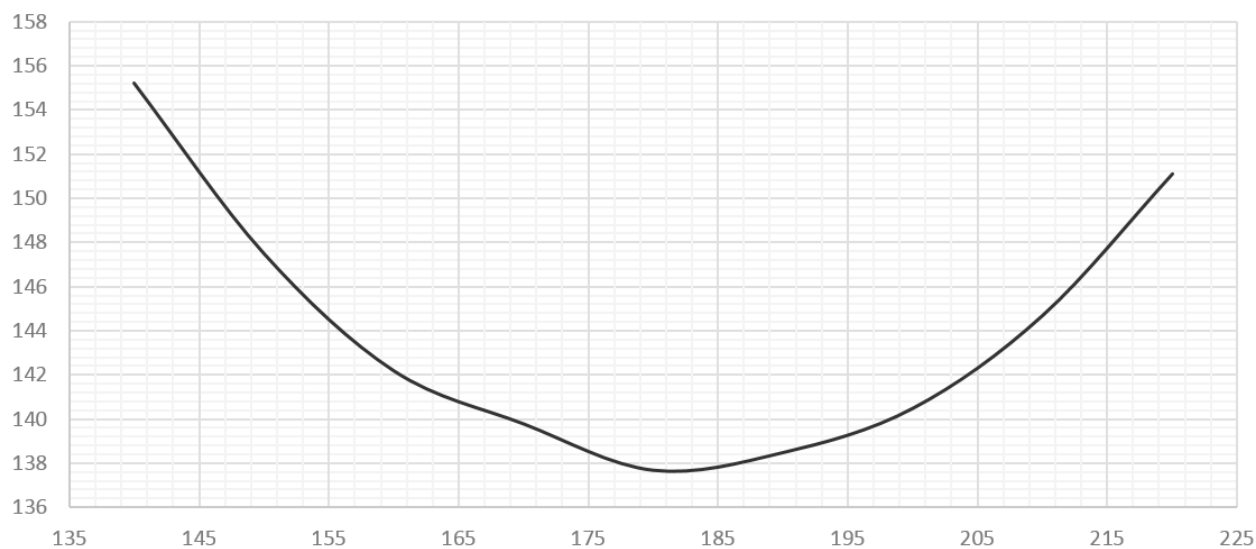


Рис. 2. Затраты характеристической скорости от угловой дальности до аварийного КА

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

На рисунке 3 показаны две зависимости продолжительности активных участков траектории от угловой дальности до аварийного КА для режима расчетной силы тяги двигательной установки сервисного КА ( $P_{дв}=P_{дв.р}$ ), а также для нештатной ситуации, когда сила тяги двигательной установки сервисного КА составляет 80 % от расчетной  $P_{дв}=0,8P_{дв.р}$ .

На графике отчетливо прослеживается значительное увеличение продолжительности активного участка траектории в случае падения силы тяги двигательной установки КА-Р. Следует отметить, что затраты характеристической скорости в обоих случаях одинаковы, однако затраты топлива во втором случае при  $P_{дв}=0,8P_{дв.р}$  будут больше, и успешное выполнение задачи перелета в окрестность аварийного КА станет зависеть от запаса топлива, имеющегося на борту сервисного КА.

### Заключение

Рассмотрена нештатная ситуация, заключающаяся в падении уровня силы тяги двигательной установки. С помощью математического моделирования подтверждены возможности применения метода приближенного корректирующего оператора для управления движением сервисного КА в условиях действия нештатных ситуаций и его способность гарантировать

выполнение задачи перелета сервисного КА в окрестность аварийного КА за заданное время в случае нештатного режима функционирования двигательной установки КА-Р ( $P_{дв}=0,8P_{дв.р}$ ) с заданной точностью  $\Delta R_{зад} = 100$  м.

### Литература

1. Макаров М.М., Миронов В.И., Миронов Ю.В. Применение метода Эйлера-Ламберта для расчета программы управления сближением космических аппаратов в нецентральной гравитационном поле Земли с конечной тягой // Вопросы электромеханики, 2015. Т.144. С.29-35.
2. Бурмистров В.В., Макаров М.М., Миронов В.И., Миронов Ю.В. Метод приближенного корректирующего оператора в задачах определения импульсной программы управления встречей космического аппарата в нецентральной гравитационном поле Земли // Механика и процессы управления. Материалы XXXIII Всероссийского симпозиума, 2013. Т.3. С.40-46.
3. Ильин В.А., Кузмак Г.Е. Оптимальные перелеты космических аппаратов / М.: Наука, 1976. 744 с.
4. Миронов В.И. Синтез итерационных алгоритмов решения краевых задач и нелинейных уравнений / В.И. Миронов, Ю.В. Миронов, Р.М. Юсупов // Известия вузов. Приборостроение, 2010. Т.53. №1. С.9-15.

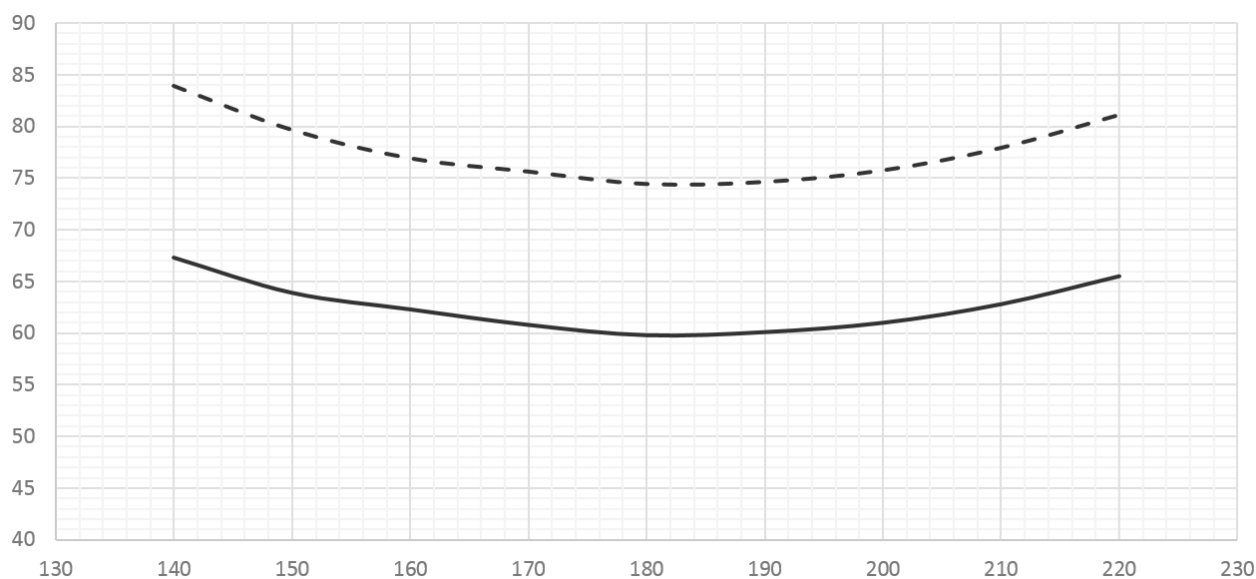


Рис. 3. Зависимости продолжительности АУТ от угловой дальности до аварийного КА для силы тяги двигательной установки  $P_{дв}=P_{дв.р}$  (---),  $P_{дв}=0,8P_{дв.р}$  (—)

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.538.54

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С РЕЗЕРВИРОВАННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ МЕТОДАМИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

## SELECTION OF PARAMETERS FOR DIAGNOSING CONVERTER DEVICES WITH REDUNDANT ELEMENTS BY PATTERN RECOGNITION METHODS

**Андрей Владимирович Лучин**

*кандидат технических наук, доцент*

начальник кафедры

филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)

Тел.: 8 (916) 422-26-96

E-mail: luchin\_svi@mail.ru

**Игорь Анатольевич Обычный**

*кандидат педагогических наук, доцент*

начальник учебно-методического отдела

филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)

Тел.: 8 (4967) 72-19-11

E-mail: igorobynochnyy@mail.ru

**Борис Александрович Усик**

*кандидат технических наук, доцент*

старший преподаватель кафедры

филиал ВА РВСН им. Петра Великого  
(г. Серпухов)

Адрес: 142210, Московская обл.,

г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17

Тел.: 8 (916) 411-34-01

E-mail: Yusik.b@yandex.ru

### Аннотация

В статье показано, что при традиционном подходе к диагностированию пытаются найти такие параметры, которые максимально реагировали бы на одни неисправности или дефекты и были бы нечувствительными к другим неисправностям или дефектам специальному тестовому воздействию, что требует дополнительных затрат и нарушает его нормальное функционирование. Рассматриваемый в статье подход основан на анализе не отдельных параметров, а анализе всей их совокупности одновременно. При этом диагностирование проводится без нарушения функционирования объекта и дается оценка степени его работоспособности.

**Ключевые слова:** диагностика, преобразовательное устройство, вектор-эталон.

### Summary

The article shows that with the traditional approach to diagnostics, they try to find parameters that would respond to some malfunctions or defects as much as possible and would be insensitive to other malfunctions or defects to a special test effect, which requires additional costs and disrupts its normal functioning. The approach considered in the article is based not on the analysis of individual parameters, but on the analysis of their entire totality at the same time. In this case, the diagnosis is carried out without disruption of the functioning of the object and an assessment of the degree of its operability is given.

**Keywords:** diagnostics, converter device, reference vector.

В науке известны методы диагностирования, основанные на теории распознавания образов. В этом случае в качестве образа выступает совокупность контролируемых параметров, измеряемых одновременно. Такая совокупность рассматривается как многомерный вектор, координатами которого являются параметры, выбранные для контроля объекта. Количество таких параметров меньше, чем число параметров, используемых при тестовом диагностировании. Особенностью методов распознавания образов

является то, что для каждого состояния объекта выбирают вектор-эталон, отличающийся от векторов, соответствующих другим состояниям объекта. Наибольшее распространение нашел метод сравнения с эталонными векторами. При данном методе распознаваемый вектор сравнивается с векторами-эталонами, соответствующими другим состояниям объекта. Объект относится к тому классу состояния, с вектором-эталонem которого он имеет наибольшее сходство.

В качестве меры сходства векторов выбирают

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

либо расстоянию между векторами, либо скалярное произведение между ними. В первом случае объект относят к тому состоянию, расстояние с соответствующим вектором-эталоном которого наименьшее. Во втором случае, скалярное произведение распознаваемого и эталонного векторов должно быть наибольшим

Обе величины задаются на многомерном Евклидовом пространстве [1]. В дальнейшем для установления сходства между векторами выберем расстояние между ними, вычисляемое в соответствии с выражением

$$r_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ji}^0)^2}, \quad (1)$$

где  $r_j$  – расстояние между распознаваемым вектором  $X(x_1, \dots, x_n)$  и вектором-эталоном для  $j$ -го состояния объекта  $X_{j_0}^0(x_{j_1}^0, \dots, x_{j_n}^0)$ .

После вычисления расстояний между распознаваемым вектором и векторами-эталоном получим множество расстояний  $R(r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_m)$ , число членов которого  $m$  равно числу состояний объекта.

Объект относят к тому из состояний, расстояние до вектора-эталона которого будет наименьшим, т.е.  $r_i = \min R(r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_m)$ .

Достоверность оценки технического состояния объекта по вектору контролируемых параметров во многом будет зависеть от того в каком количестве и в каком сочетании эти параметры будут использованы. Можно предположить, что, если отобрать некоторое число параметров, измерение которых может производиться достаточно просто и без нарушения функционирования объекта то диагностическая ценность выбранных параметров будет определяться не столько величиной изменения каждого параметра в отдельности, сколько в одновременном взаимном изменении параметров относительно друг друга при переходе объекта в различные состояния.

Предположим, что рассматривается совокупность из  $n$  параметров, полученных в точках объекта, доступных для измерения. Задача заключается в отборе из исходной совокупности параметров такого их количества и в таком сочетании, при которых будет обеспечено достоверное определение всех  $m$  состояний объекта. Решению этой задачи и посвящена статья.

На рисунке 1 представлена функциональная электрическая схема силовой части импульсного стабилизатора напряжения.

Элементы схемы, такие как транзисторы, диоды, конденсаторы зарезервированы, а это значит, что отказ отдельных из этих элементов не приведет к отказу преобразователя в целом, так как резервирование выполнено с избыточностью.

Был проведен эксперимент на действующем импульсном стабилизаторе напряжения в заводских условиях. Стабилизатор переводился в неисправные состояния, в каждом из которых из цепи выключался один из зарезервированных элементов, и измерялись напряжения между соответствующими точками ( $U_1, U_2, \dots, U_5$ ). Результаты эксперимента сведены в таблицу 1.

В качестве нормирующего выражения использовалось выражение  $\bar{U}_i = U_i / U_{i0}$ .

Таким образом, в результате эксперимента для каждого состояния преобразователя были получены отличающиеся друг от друга вектора контролируемых параметров.

В соответствие с теорией многомерного пространства каждому многомерному вектору соответствует определенная точка этого пространства. В силу случайного характера контролируемых величин каждому состоянию объекта соответствует множество точек этого пространства. Очевидно, достоверность диагностирования будет тем выше, чем больше эти множества удалены друг от друга. Поскольку в качестве координат векторов-эталонов взяты средние значения этих параметров для соответствующей

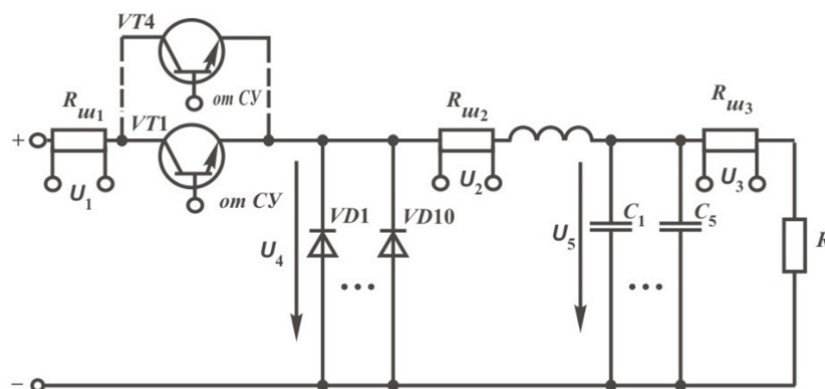


Рис. 1. Схема электрическая функциональная импульсного стабилизатора напряжения

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

щих состояний объекта, то о диагностической ценности выбранной совокупности параметров можно судить по тому, как ухудшится различие между векторами-эталоном после удаления из  $n$ -параметров выбранной совокупности параметров. Такие совокупности могут представлять собой сочетания из  $n$  параметров по  $2, 3, \dots, n-1, \dots, n$  параметров. Число таких сочетаний можно определить по формуле

$$v = \sum_{i=1}^n C_n^i = 2^n - 1, \quad (2)$$

где  $i$  – количество членов сочетания.

При помощи специального алгоритма из исходного числа параметров  $n$  можно создать подмножества сочетаний по  $2, 3, \dots, n-1$  параметров и для каждого из них найти сочетание, обладающее наибольшей диагностической ценностью.

Диагностическая ценность  $v$ -го сочетания

определяется по степени изменения расстояния между исходным вектором из  $n$  параметров и вектором, формируемым из исходного вектора путем удаления из него  $v$ -го сочетания параметров. Для каждого из полученных множеств из сочетаний по  $2, 3, \dots, n-1$  параметров определяют наиболее ценное сочетание.

После оценки сочетаний для различных подмножеств выбирают одно из лучших состояний с таким количеством элементов, которая обеспечивает попарную различимость всех состояний объекта.

### Литература

1. Технические средства диагностирования. Справочник / В.В. Ключев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др. Под общ. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.

**Таблица 1**

Значения напряжений для различных состояний преобразователя

Состояние преобразователя	Нормированные значения контролируемых параметров			
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$
Исправное	1.0	1.0	1.0	1.0
Отказ одного из транзисторов	1.091	1.181	1.416	0.965
Отказ одного из десяти защитных диодов	1.223	1.350	1.058	1.004
Отказ первого из пяти конденсаторов	1.396	0.777	1.227	1.01





УДК 621.398.8

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ КОДИРОВАНИЯ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ

## EFFICIENCY OF DATA ENCODING METHODS IN RADIO COMMUNICATION SYSTEMS

**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 кафедры  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17  
Тел.: 8 (920) 093-65-12  
E-mail: chernousov@mail.ru

**Юрий Владимирович Зеленецкий**  
доктор технических наук, доцент  
научный сотрудник  
ВА РВСН им. 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  
АНО «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

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

### Аннотация

В статье выполнена сравнительная оценка статистических характеристик декодирования данных в системах радиосвязи с повторением кодовых комбинаций, с использованием сигнала с расширенным спектром по методу ПСП и с кодовым уплотнением данных. Предложен общий показатель эффективности, позволяющий сделать вывод о целесообразности применения того или иного метода передачи данных.

**Ключевые слова:** кодограмма, мажоритарная обработка кода, вероятность ошибочного декодирования кодограммы, отношение помеха/сигнал, расширение спектра сигнала, псевдослучайная последовательность, кодовое уплотнение данных, ортогональные последовательности Уолша-Адамара, коэффициент расширения спектра сигнала.

### Summary

The article presents a comparative assessment of the statistical characteristics of data decoding in radio communication systems with the repetition of code combinations, using a signal with an extended spectrum using the PSP method and with code compaction of data. A general efficiency indicator is proposed, which makes it possible to conclude that it is advisable to use a particular method of data transmission.

**Keywords:** codogram, majority processing of the code, probability of erroneous decoding of the codogram, interference/signal ratio, signal spectrum expansion, pseudorandom sequence, data code compaction, orthogonal Walsh-Hadamard sequences, signal spectrum expansion coefficient.

Известны системы передачи данных, которые для повышения достоверности принятых данных используют  $M$ -кратное повторение кодовых комбинаций на передающей стороне и мажоритарную обработку комбинаций на приемной стороне [1,4].

Структурная схема такой системы передачи представлена на *рисунке 1*.

На *рисунке 1* обозначены:

ООД – оконечное оборудование данных, формирующее кодограмму длиной  $N$  двоичных символов;

КУ – кодирующее устройство, которое каждому блоку  $k$  двоичных символов кодограммы ставит в однозначное соответствие  $n$  двоичных символов кода ( $n > k$ ) с минимальным кодовым

расстоянием  $d_{\min} > 1$ ;

$M$  – модулятор, который формирует сигнал с двоичной относительной фазовой манипуляцией;

ОК – оконечные каскады радиопередатчика, которые обеспечивают заданную мощность излучения в антенне  $WA_1$  и требуемую полосу пропускания  $\Delta F$  канала радиосвязи;

ВК – входные каскады радиоприемника, которые обеспечивают частотную избирательность в полосе  $\Delta F$  и усиление принятого антенной  $WA_2$  радиочастотного сигнала по мощности, формируют на выходе отношение сигнал/шум  $h_0^2$ , необходимое для достоверной работы радиоприемника;

ДМ – демодулятор (первая решающая схема) выносит решение о принятом двоичном символе с вероятностью

$$P_0 = f\left(h_0^2, \frac{P_{\Pi}}{P_C}\right),$$

где  $\frac{P_{\Pi}}{P_C}$  – отношение мощностей помехи и сигнала;

БМО – блок мажоритарной обработки принятых двоичных символов кодовой комбинации, реализующий принцип принятия решения о двоичном символе по большинству однозначных символов их  $M$  повторов (см. рисунок 2).

ДКУ – декодирующее устройство, обнаруживающее и исправляющее возможные ошибки в принятой кодовой комбинации на выходе БМО с вероятностью битовой ошибки

$$P_b \approx \frac{1}{n} \sum_{i=t_u+1}^n C_n^i P_M^i (1-P_M)^{n-i},$$

где  $t_u = \left\lceil \frac{d_{\min} - 1}{2} \right\rceil$ ;  $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ ;  $P_M \approx \sum_{j=\frac{M+1}{2}}^M C_M^j P_0^j (1-P_0)^{M-j}$ .

Тогда вероятность ошибочного декодирования  $N$ -разрядной кодовой комбинации будет определяться выражением  $P_{\text{ош.дov.}} = 1 - (1 - P_b)^N$ .

Для демодулятора, реализующего когерентный прием двоичного сигнала с относительной

фазовой манипуляцией при воздействии на вход радиоприемника аддитивного белого гауссовского шума и узкополосной гармонической помехи, средняя вероятность ошибки  $P_0$  определяется выражением

$$P_b \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\left(\frac{1}{h_0^2} + \frac{P_{\Pi}}{P_C}\right)^{-0.5}}^{\infty} e^{-t^2} dt$$

Зададимся параметрами двоичного кода:  $n=35$ ;  $k=29$ ;  $d_{\min}=3$  и длиной кодовой комбинации  $N=120$  двоичных символов. Число повторов выберем  $M=31$ .

В таблице 1 представлены оценки вероятностей  $P_0$ ,  $P_{\text{ош.дov.}}$  в зависимости от  $h_0^2$  при  $\frac{P_{\Pi}}{P_C}=2$ .

Анализ таблицы 1 показывает:

- системы радиосвязи с повторами кодовых комбинаций могут обеспечивать вероятность  $P_{\text{ош.дov.}} \leq 10^{-3}$  при  $h_0^2 \geq 0,581$  (теоретический предел К. Шеннона  $h_0^2 \geq 44,055$ );

- значение отношения  $\frac{P_{\Pi}}{P_C}=2$  накладывает ограничения на возможное уменьшение вероятности  $P_0$  на выходе демодулятора при увеличении  $h_0^2$  (при  $h_0^2 \geq 44,055$  вероятности  $P_0$  и  $P_{\text{ош.дov.}}$  достигают предельного значения, а при увеличении  $\frac{P_{\Pi}}{P_C} \left( \frac{P_{\Pi}}{P_C}=10 \right)$  значения  $P_0$  и  $P_{\text{ош.дov.}}$  становятся недопустимо высокими).

При  $\frac{P_{\Pi}}{P_C}=10$  значения  $P_{\text{ош.дov.}}$  представлены в таблице 2.

Анализ таблицы 2 позволяет сделать важный для практической связи вывод – при  $\frac{P_{\Pi}}{P_C}=10$  метод повторов кодовых комбинаций не работает, так как увеличение отношения  $h_0^2$  не позволяет уменьшить вероятность  $P_{\text{ош.дov.}}$ .

Известны системы радиосвязи, которые для повышения достоверности принятых данных, используют сигналы с расширенным спектром по методу прямой модуляции несущей псевдослучайной последовательностью (ПСП) [2]. Структурная схема такой системы радиосвязи представлена на рисунке 3.

На рисунке 3 обозначены новые структурные элементы:



Рис. 1. Структурная схема системы передачи данных, использующая мажоритарную обработку

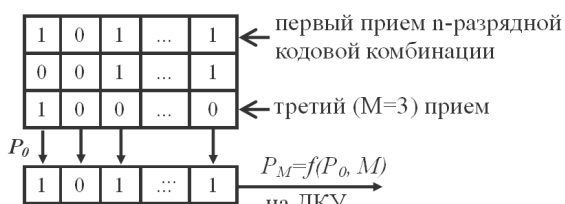


Рис. 2

Таблица 1  $\frac{P_{\Pi}}{P_C} = 2$   
Оценки  $P_0$ ,  $P_{\text{ош.дov.}}$  при  $P_C$

$h_0^2$	0,581	0,9036	1,57	3,251	44,055	100
$P_0$	0,2317	0,2113	0,192	0,176	0,16	0,16
$P_{\text{ош.дov.}}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

ИМ – информационный модулятор, который формирует сигнал с относительной фазовой модуляцией;

G – генератор сигнала несущей частоты;

PM – расширяющий модулятор, который осуществляет дополнительную фазовую манипуляцию несущей по закону изменения двоичного кода генератора псевдослучайной последовательности (ГПСП);

БС – блок синхронизации по частоте несущей и времени задержки ПСП передающего и приемного трактов [2].

Средняя вероятность ошибки  $P_0$  на выходе ДМ для такой системы определяется выражением

$$P_b \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-t^2} dt \left( \frac{1 + \frac{P_n}{P_c}}{h_0^2 + \frac{P_n}{P_c}} \right)^{0.5},$$

где  $B$  – база сигнала (коэффициент расширения спектра), равная длине ПСП.

Средняя вероятность битовой ошибки на выходе ДКУ будет равна

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

а вероятность  $P_{\text{ош. дов.}} = 1 - (1 - P_b)^N$ .

В таблице 3 представлены оценки  $P_0, P_b, P_{\text{ош. дов.}}$  при  $\frac{P_n}{P_c} = 2, B = 31$  ( $B = 31$  выбрано из соображений однозначного сравнения результатов с  $M = 31$  в таблице 1), параметры кода оставлены без изменения.

Анализ таблицы 3 показывает:

– системы радиосвязи с расширенным спектром сигнала (в нашем примере коэффициент

расширения спектра равен  $B = 31$ ) не могут обеспечить вероятность  $P_{\text{ош. дов.}} \leq 10^{-3}$  при  $h_0^2 \leq 10$ ;

– при отношении  $h_0^2 \geq 30$  сигналы с расширением спектра позволяют получить более низкие значения вероятности  $P_{\text{ош. дов.}}$  (при соблюдении условия  $M = B$ ) по сравнению с повторами кодовых комбинаций.

Таким образом, при малых значениях  $h_0^2$  на входе демодулятора ( $h_0^2 \leq 10$ ) метод повторов кодовых комбинаций позволяет обеспечить меньшее значение вероятности  $P_{\text{ош. дов.}}$  по сравнению с методом расширения спектра сигнала, а при  $h_0^2 \geq 30$  преимущества за методом расширения спектра сигнала.

Однако при увеличении отношения  $\frac{P_n}{P_c}$  результаты оценки  $P_{\text{ош. дов.}}$  становятся совершенно другими. В таблице 4 представлены оценки  $P_{\text{ош. дов.}}$  для  $B = 31, B = 127$ , но  $\frac{P_n}{P_c} = 10$ .

Анализ результатов, представленных в таблице 4, показывает:

– при  $B = \text{const}$  для  $h_0^2 \geq 20$  снижение вероятности  $P_{\text{ош. дов.}}$  незначительное;

– при  $h_0^2 = \text{const}$  увеличение базы сигнала приводит к уменьшению  $P_{\text{ош. дов.}}$ , особенно существенное уменьшение  $c$  при  $h_0^2 \geq 10$ .

Известны системы радиосвязи с кодовым уплотнением данных, которые для повышения помехоустойчивости используют не только когерентный прием сигналов целом, но и преимущества расширения спектра сигнала [3,4]. Структурная схема такой системы радиосвязи представлена на рисунке 4.

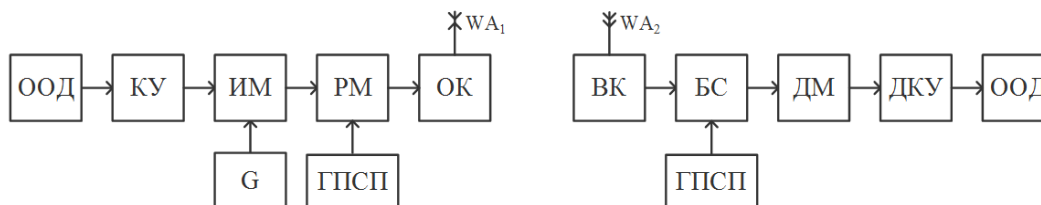


Рис. 3. Структурная схема системы радиосвязи, использующая расширение спектра сигнала

Таблица 2  
Значения  $P_{\text{ош. дов.}} = f(h_0^2)$  при  $\frac{P_n}{P_c} = 10$

$h_0^2$	0,581	0,9036	1,57	3,251	100
$P_0$	0,3398	0,336	0,332	0,332	0,332
$P_{\text{ош. дов.}}$	0,9207	0,88	0,83	0,83	0,83

Таблица 3  
Оценки  $P_0, P_{\text{ош. дов.}}$  при  $\frac{P_n}{P_c} = 10, B = 31$

$h_0^2$	5,251	6,02	10	20	30
$P_0$	0,01	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$2,45 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$
$P_b$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$3,47 \cdot 10^{-5}$	$2,06 \cdot 10^{-6}$	$7,39 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-10}$
$P_{\text{ош. дов.}}$	0,293	$4,155 \cdot 10^{-3}$	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$8,868 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-8}$

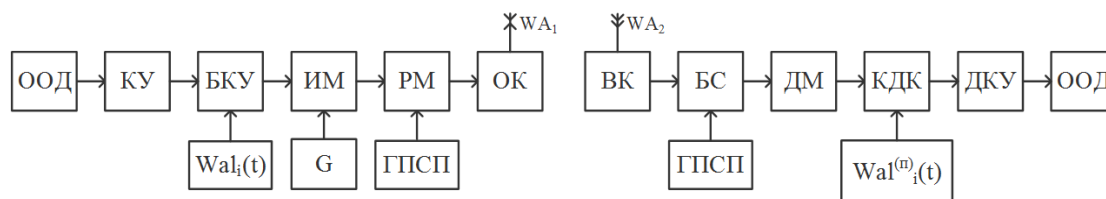


Рис. 4. Структурная схема системы радиосвязи с кодовым уплотнением данных

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

На рисунке 4 обозначены новые структурные элементы:

БКУ – блок кодового уплотнения данных;

$Wal_i(t)$  – генератор ортогональных последовательностей Уолша-Адамара;

КДК – корреляционный декодер;

$Wal_i^{(n)}(t)$  – генератор полярных ортогональных последовательностей Уолша-Адамара.

Средняя вероятность битовой ошибки  $P_b$  при воздействии гармонической помехи на входе КДК для такой системы определяется выражением

$$P_b \approx 0,5 \left[ 1 - \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-t^2} dt \right]^{n_w} \right],$$

$$\left( \frac{1}{i,2} + \frac{P_n}{P_c} \right)^{-0,5}$$

где  $h_s^2$  – сигнальное отношение сигнал/шум, равное  $h_s^2 = n_w h_b^2$ ;

$n_w$  – длина ортогональной последовательности Уолша-Адамара;

$h_b^2$  – битовое отношение сигнал/шум.

В таблице 5 представлены оценки вероятностей  $P_{ош.дов}$  для метода кодового уплотнения данных ( $n_w=8, B=256$ ) и метода кодового уплотнения данных с повторами кодовых комбинаций ( $M=13$ ) (в таблице  $K_s$  – коэффициент расширения спектра, равный  $K_s = \frac{B}{n_w}$ ).

Анализ результатов, представленных в таблице 5, показывает:

– метод кодового уплотнения данных позво-

ляет значительно уменьшить вероятность  $P_{ош.дов}$  при одинаковых условиях по  $h_b^2, K_s, M$ ;

– увеличение базы сигнала при кодовом уплотнении данных ( $B=256, K_s=32$ ) не самый лучший метод уменьшения вероятности  $P_{ош.дов}$ , так как при методе повторов кодовых комбинаций ( $M=13$ ) значения вероятности  $P_{ош.дов}$  уменьшилось на несколько десятичных порядков (при  $h_b^2=0,9036, M=13$ , код (35,29,3),  $\frac{P_n}{P_c}=2$  значение  $P_{ош.дов}=9,38 \cdot 10^{-10}$ , а без кодового уплотнения данных (таблица 1 при  $M=31$ ) значение  $P_{ош.дов}=10^{-4}$ , при этом можно уменьшить время передачи в  $31/13 \approx 2,5$  раза).

В таблице 6 представлены оценки вероятности  $P_{ош.дов}$  для других значений параметров  $n_w, B$  и  $M$  (код оставим без изменения 35, 29, 3).

Анализ результатов, представленных в таблице 6, позволяет сделать выводы о том, что увеличение длины ортогональной последовательности Уолша-Адамара весьма эффективный способ уменьшения вероятности  $P_{ош.дов}$  (при числе повторов  $M=3, n_w=B=16$  значение  $P_{ош.дов}$  меньше, чем для  $M=7, n_w=B=8$ ). Это значит, время передачи кодограммы уменьшается в  $7/3 \approx 2,33$  раза и соответственно экономится энергия сигнала на передачу.

Представленные результаты свидетельствуют о наличии противоречий к требованиям по параметрам кодирования данных:

– увеличение скорости корректирующего кода  $k/n$ , с одной стороны, уменьшает частотные затраты по полосе пропускания (положительный результат), а с другой стороны – увеличи-

**Таблица 4**  
Значения  $P_{ош.дов} = f(h_0^2)$  при  $\frac{P_n}{P_c}=10$

B=31	$h_0^2$	3,251	6,02	10	20	30
	$P_o$	0,0374	0,0215	0,0148	0,0102	$8,886 \cdot 10^{-3}$
	$P_{ош.дов}$	0,99	0,926	0,833	0,701	0,657
B=127	$h_0^2$	3,251	6,02	10	20	30
	$P_o$	0,01148	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$4,114 \cdot 10^{-4}$	$3,96 \cdot 10^{-5}$	$1,176 \cdot 10^{-5}$
	$P_{ош.дов}$	0,75	0,723	0,048	$4,41 \cdot 10^{-3}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$

**Таблица 5**  
Значения  $P_{ош.дов} = f(h_0^2)$  при  $\frac{P_n}{P_c}=2$  для кода (35, 29, 3),  $N=120$  двоичных символов

$n_w=8; B=256; K_s=256/8=32$				$n_w=8; B=256; K_s=1; M=13$			
$h_b^2$	0,581	0,9036	1,57	$h_b^2$	0,581	0,9036	1,57
$h_s^2 = n_w h_b^2$	4,648	7,2288	12,56	$h_s^2 = n_w h_b^2$	4,648	7,2288	12,56
$P_o$	$5,41 \cdot 10^{-3}$	$4,254 \cdot 10^{-4}$	$3,36 \cdot 10^{-6}$	$P_o$	0,0712	0,04454	0,0268
$P_b$	$9,23 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$3,868 \cdot 10^{-10}$	$P_{ош.дов}$	$4,44 \cdot 10^{-7}$	$9,38 \cdot 10^{-10}$	$9,46 \cdot 10^{-13}$
$P_{ош.дов}$	0,105	$7,437 \cdot 10^{-4}$	$4,642 \cdot 10^{-8}$				

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

вает вероятность битовой ошибки (снижает помехоустойчивость радиоканала);

- увеличение битового отношения сигнал/шум, с одной стороны, снижает вероятность битовой ошибки (повышает помехоустойчивость радиоканала), а с другой стороны – увеличивает энергетические затраты на передачу данных (отрицательный результат);

- увеличение числа повторов  $M$ , с одной стороны, способствует уменьшению  $P_b$ , а с другой стороны, требует увеличения энергетических затрат;

- увеличение скорости скремблирования  $n_w/B$ , с одной стороны, повышает помехоустойчивость приема сигнала в целом (положительный результат), а с другой стороны, увеличение  $n_w/B$  требует уменьшения значений базы сигнала  $B$ , что снижает помехоустойчивость радиоканала к предельно малым помехам с отношением  $P_{\text{пр}}/P_c$ .

Исходя из этих соображений, показатель эффективности кодирования данных будет определяться выражением

$$\nu = \frac{k}{M \cdot n} \frac{n_w}{B} \frac{P_{\text{пр}}}{P_c h_b^2}$$

$$\begin{cases} \text{при} \\ P_b = f\left(\frac{k}{n}, h_b^2, \frac{n_w}{B}, \frac{P_{\text{пр}}}{P_c}\right) = \text{const}; \\ P_{\text{ош.дov.}} = 1 - (1 - P_b)^N = \text{const}; \\ P_{\text{прд}} = \text{const}. \end{cases}$$

где  $P_{\text{прд}}$  – мощность передатчика.

В *таблице 7* представлены оценки показателя  $\nu$  для исследуемых методов кодирования данных при условии, что выполняется условие  $P_{\text{ош.дov.}} = 10^{-4}$ .

Анализ результатов, представленных в *таблице 7*, показывает:

- параметры корректирующего кода ( $n, k, d_{\text{min}}$ ) определяют эффективность системы передачи данных (в нашем случае код (23,12,7) более эффективен по сравнению с кодом (136,120,3);

- метод кодового уплотнения данных с избыточностью обладает наибольшей эффективностью.

**Таблица 6**

Значения  $P_{\text{ош.дov.}} = f(n, B)$  при  $P_{\text{пр}}/P_c, K_s = 1$

$h_0^2$	$n_w = B$	$M$	$P_{\text{ош.дov.}}$	$n_w = B$	$M$	$P_{\text{ош.дov.}}$	$n_w = B$	$M$	$P_{\text{ош.дov.}}$
0,581	8	5	0,041	16	3	$1,1 \cdot 10^{-3}$	8	7	$2,396 \cdot 10^{-3}$
0,9036	8	5	$2,79 \cdot 10^{-3}$	16	3	$2,89 \cdot 10^{-5}$	8	7	$6,36 \cdot 10^{-5}$
1,57	8	5	$1,43 \cdot 10^{-4}$	16	3	$5,54 \cdot 10^{-7}$	8	7	$1,21 \cdot 10^{-6}$
3,251	8	5	$8,68 \cdot 10^{-6}$	16	3	$1,395 \cdot 10^{-8}$	8	7	$2,91 \cdot 10^{-8}$

**Таблица 7**

Эффективность методов кодирования данных ( $P_{\text{ош.дov.}} = 10^{-4}$ )

Код (136, 120, 3)		Код (23, 12, 7)	
Повторы $M=7; P_{\text{пр}}/P_c=0,5;$ $h_0^2=6,61;$ $n_w=B=1.$	$\nu=0,009535 \equiv$ $\equiv -20,207 \text{ дБ.}$	Повторы $M=7; P_{\text{пр}}/P_c=0,5;$ $h_0^2=0,117$ $n_w=B=1.$	$\nu=0,009535 \equiv$ $\equiv -20,207 \text{ дБ.}$
Расширение спектра $M=1; P_{\text{пр}}/P_c=50;$ $h_0^2=20,9;$ $B=511.$	$\nu=0,00413 \equiv$ $\equiv -23,84 \text{ дБ.}$	Расширение спектра $M=1$ $P_{\text{пр}}/P_c=50;$ $h_0^2=0,1057;$ $B=511.$	$\nu=0,48298 \equiv$ $\equiv -3,161 \text{ дБ.}$
Кодовое уплотнение данных (безыбыточное) $M=1, n_w=B=8) P_{\text{пр}}/P_c=0,5;$ $h_0^2=2,0893.$	$\nu=0,211 \equiv$ $\equiv -6,757 \text{ дБ.}$	Кодовое уплотнение данных (безыбыточное) $M=1, n_w=B=8) P_{\text{пр}}/P_c=0,5;$ $h_0^2=2,0893.$	$\nu=3,34448 \equiv$ $\equiv 5,243 \text{ дБ.}$
Кодовое уплотнение данных (безыбыточное) $M=1,$ $n_w=B=8)$ $P_{\text{пр}}/P_c=5;$ $h_0^2=2,5.$	$\nu=0,211 \equiv$ $\equiv -6,556 \text{ дБ.}$	Кодовое уплотнение данных (избыточное) $M=1,$ $n_w=8, B=64)$ $P_{\text{пр}}/P_c=5;$ $h_0^2=0,089.$	$\nu=3,6638 \equiv$ $\equiv 5,639 \text{ дБ.}$

### Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. Пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2017. 1104 с.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Шестопалов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательно-

стью / Под ред. В.И. Борисова. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Радиософт, 2011. 550 с.

3. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Дурнов А.С. Статистические характеристики системы передачи с кодовым уплотнением данных при воздействии гауссова шума // Электросвязь, 2018. №7. С.42-45.

4. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1965. 400 с.

# РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.37

## РАДИОМОНИТОРИНГОВЫЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ САМОЛЕТОПОТОКОВ НА АЭРОДРОМАХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

## RADIOMONITORING METHOD FOR EVALUATION OF AIRCRAFT FLOW ON AIRROMES TO ENSURE SAFE AIRCRAFT TRAFFIC

### Олег Игоревич Атакищев

почетный работник науки и высоких технологий РФ  
доктор технических наук, профессор  
заместитель генерального директора  
по специальным проектам  
АНО «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: aoi007@mail.ru

### Анатолий Иванович Мухин

кандидат технических наук  
преподаватель 55 кафедры  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7(965) 011-44-65  
E-mail: tolik516@yandex.ru

### Евгений Николаевич Белихин

кандидат технических наук  
старший инженер учебной лаборатории  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (981) 731-58-80  
E-mail: belihin.en@gmail.com

### Алексей Сергеевич Тонков

курсант  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13

#### Аннотация

В статье представлен радиомониторинговый метод оценивания параметра самолетополюков на аэродромах для обеспечения безопасного движения воздушных судов. Суть метода состоит в обработке параметров радиосигналов аэродромных радиолокационных станций управления воздушным движением. В результате обработки выявляется смена режимов функционирования радаров в результате чего формируется вывод о самолетополюке аэродрома. В статье рассмотрены основные параметры типовых радаров посадки, представлены результаты обработки и представлены основные этапы оценки параметра самолетополюка аэродромов.

**Ключевые слова:** радиолокационные станции управления воздушным движением, обеспечение безопасного движения воздушных судов, самолетополюк на аэродромах, режимы функционирования локаторов.

#### Summary

The article presents an alternative method for estimating air traffic at airfields to ensure the safe movement of aircraft. The essence of the method consists in processing the parameters of radio signals from airfield radar stations for air traffic control. As a result of processing, a change in the modes of operation of the radars is revealed, as a result of which a conclusion is formed about the airfield traffic. The article considers the main parameters of typical landing radars, presents the results of processing and presents the stage of forming conclusions about the airflow of airfields.

**Keywords:** radar stations for air traffic control, ensuring the safe movement of aircraft, air traffic at airfields, operating modes of radars.

#### Введение

В настоящее время целью повышения безопасного движения воздушных судов наиболее широко в авиационной сфере используется технология АЗН-В (автоматическое зависимое наблюдение-вещание, английское название ADS-B – automatic dependent surveillance-broadcast). Данная технология позволяет с определенной достоверностью и для большого круга

областей использования проводить мониторинг движения воздушных судов в реальной масштабе времени. Наблюдение осуществляется благодаря установке на борт самолетов АЗН-В транспондеров, которые на определенной радиочастоте транслируют в эфир информацию о координатах борта, его скорости, высоте и другую служебную информацию.

Однако, для ряда условий применений (в том

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

числе и военно-прикладных) [1-2], данная технология не позволяет достоверно и для всех режимов оценивать параметры самолетопотоков на аэродромах. В данной статье, в дополнение и развитие данной технологии предлагается радиомониторинговый метод оценивания параметров самолетопотоков на аэродромах за счет приема и анализа радиоизлучений от радиолокационных станций (РЛС) управления воздушным движением (УВД).

### Основная часть

В данной статье рассматриваются такой параметр самолетопотока как зафиксированное число взлетов и посадок воздушных судов в единицу времени в конкретном аэропорту. Число взлетов и посадок предлагается выявлять с помощью приема и анализа радиоизлучений РЛС УВД.

В данной статье, для примера, будут рассматриваться РЛС УВД США. На территории всех муниципальных аэропортов США используются следующие стационарные РЛС УВД: ASR-9, ASR-11, Hi-PAR. Рассмотрим указанные радары более подробно.

РЛС ASR-9 (второе наименование AN/GPN-

20) является одним из первых цифровых радаров, который пришел на смену своему аналоговому предшественнику ASR-8. РЛС ASR-9 работает в двух основных режимах функционирования: обнаружение самолетов в дальней зоне и последующее сопровождение цели.

РЛС ASR-11 (DASR или AN/GPN-30) является модернизированной версией ASR-9 способной определять местоположение не только самолетов, но и грозовых облаков вокруг аэродрома. Радар ASR-11 обладает возможностью обнаружения и классификации дождевых облаков по шести степеням интенсивности.

РЛС Hi-PAR (AN/GPN-22) – это высокоточный радар, функционирующий в ближней зоне. Радар предназначен для максимально точного сопровождения самолетов в момент взлета и посадки. РЛС Hi-PAR представляет собой гибридную зеркальную антенну, облучатель которой состоит из фазированных антенных решеток. Высокая точность определения местоположения воздушных целей достигается за счет использования зондирующих сигналов в X-радиодиапазоне. Использование облучателя с фазированными антенными решетками позволяет радару одновременно сопровождать до ше-

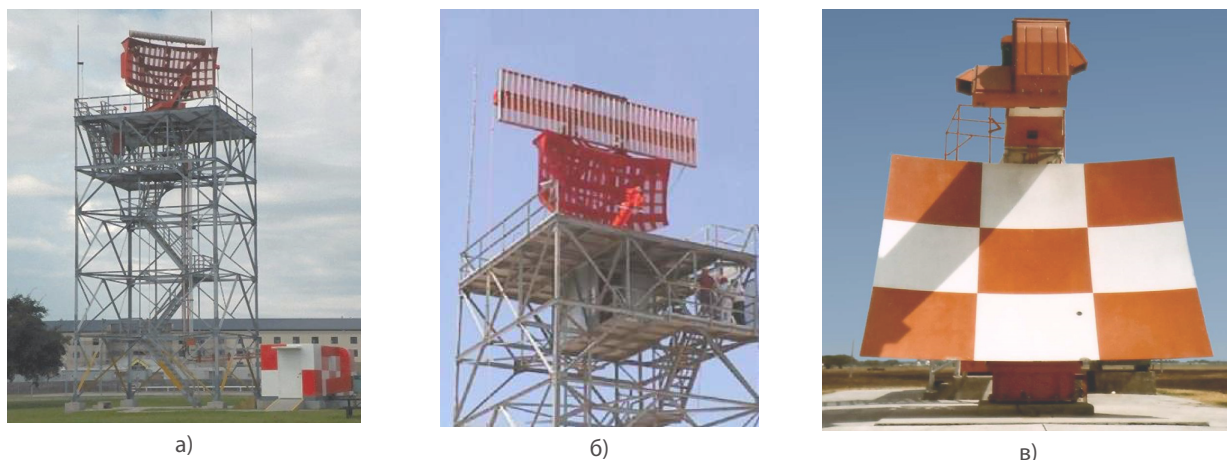


Рис. 1. Внешний вид РЛС УВД: а) ASR-9, б) ASR-11, в) Hi-PAR

Таблица 1  
Параметры РЛС УВД

Наименование РЛС	Зона обзора в режиме обзора/посадки, град.		Радиочастоты в режиме обзора/посадки, МГц	Ширина спектра радиосигнала, МГц	Импульсная мощность излучения, кВт	Длительность импульса, мкс	Период следования импульсов, мкс	Размеры антенны, м
	По азимуту	По углу места						
ASR-9	360	30	2700-2780/ 2780-2900	40/ 80	1300	1	833,3-3076,9	4,9x2,7
ASR-11	360	30	2700-2780/ 2780-2900	40/ 80	34	1	1000	4,9x2,7
Hi-PAR	20	8	8000- 9800/ 9800-12000	90/ 160	120	0,5; 1; 2	285,7	4,7x4

сти самолетов, находящихся в секторе с азимутальным углом  $20^\circ$ . РЛС Hi-PAR устанавливается на аэродромах с большим самолетопотоком.

Внешний вид рассматриваемых РЛС УВД представлен на *рисунке 1*.

Параметры РЛС УВД являются справочной информацией и представлены в *таблице 1*.

Предлагаемый в данной статье радиомониторинговый метод оценивания параметров самолетопотоков на аэродромах для обеспечения безопасного движения воздушных судов включает три основных этапа:

- 1) измерение параметров радиосигналов РЛС УВД;
- 2) комплексная обработка результатов измерений параметров сигналов РЛС УВД;
- 3) проведение оценки параметров самолетопотока аэродромов.

Особенностью первого этапа радиомониторинга в данном методе является измерение с помощью соответствующих мониторинговых средств параметров радиосигналов РЛС УВД, представленных в *таблице 1*.

Выполнение второго этапа заключается в вычислении на основе полученных измерений следующих характеристик РЛС УВД:

- разрешающих способностей РЛС (по азимуту, по углу места, по радиальной скорости),
- углов раскрытия диаграммы направленности антенны,
- дальности действия РЛС,
- коэффициента усиления РЛС.

Рассмотрим данные характеристики более детально.

Разрешающая способность РЛС характеризует способность раздельного измерения параметров у двух или нескольких близко расположенных в пространстве объектов.

Обычно выделяют следующие разрешающие способности РЛС по углам:

- по азимуту (в горизонтальной плоскости  $X$ ),
- по углу места или, как еще называют, по дальности (в вертикальной плоскости  $Y$ ).

Разрешающая способность РЛС по азимуту оценивается:

$$\Delta x = \frac{X \cdot \lambda}{2}, \quad (1)$$

где  $X$  – ширина антенны;

$\lambda$  – длина волны радиосигнала.

Разрешающая способность РЛС по углу места зависит только от ширины спектра сигнала и оценивается по формуле:

$$\Delta y = \frac{c}{2 \cdot \Delta f}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света ( $3 \cdot 10^8$  м/с);

$\Delta f$  – ширина спектра сигнала.

Также различают разрешающую способность

РЛС по радиальной скорости цели:

$$\Delta V = \frac{\lambda}{2 \cdot \tau_u}, \quad (3)$$

где  $\tau_u$  – длительность импульса радиосигнала.

Угол раскрытия диаграммы направленности (в градусах) для прямоугольной антенны в сечении  $X$  вычисляется по формуле:

$$Q_x = \frac{\lambda \cdot 180}{X \cdot \pi}. \quad (4)$$

Угол раскрытия диаграммы направленности (в градусах) для прямоугольной антенны в сечении  $Y$  вычисляется по формуле:

$$Q_y = \frac{\lambda \cdot 180}{Y \cdot \pi}. \quad (5)$$

Дальность действия РЛС характеризуется максимальным расстоянием, на котором обеспечивается получение заданных откликов (показателей ответных сигналов).

Обычно на этой дальности еще обеспечивается достаточное отношение сигнал/шум для обнаружения цели с заданной вероятностью.

Различают минимальную, однозначную и потенциальную дальности действия РЛС.

Минимальная дальность действия – это расстояние, на котором РЛС неспособно обнаруживать цели. Вычисление осуществляется по формуле:

$$D_{min} = \frac{c \cdot \tau_H}{2} \quad (6)$$

Однозначная дальность действия РЛС (основное уравнение радиолокации) – это максимальное расстояние, на котором объекты обнаруживаются с заданной вероятностью. Расчет такой дальности осуществляется по формуле:

$$D_{одн} = \sqrt[4]{\frac{P_{пер} G^2 \lambda^2 \sigma_y}{(4\pi)^3 P_{пр}}} \quad (7)$$

где  $P_{пр}$  – излучаемая мощность радиосигнала;

$G$  – коэффициент усиления приемо-передающей антенны;

$\sigma_y$  – эффективная площадь рассеяния цели;

$P_{пр}$  – мощность отраженного радиосигнала на входе радиоприемного устройства.

Потенциальная дальность действия РЛС – это теоретически возможная максимальная дальность действия РЛС. Как правило, это расстояние на 20% больше, чем однозначная дальность действия РЛС. Потенциальная дальность действия РЛС вычисляется:

$$D_{пот} = \frac{c \cdot T}{2}. \quad (8)$$

Значение коэффициента усиления передающей/приемной антенны, как правило, является справочной информацией, однако, если такие сведения отсутствуют, то КУ антенны оценивается по формуле

$$G_{пер} = \frac{4 \cdot \pi \cdot S_a \cdot \eta}{\lambda^2}, \quad (9)$$



## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

где  $S_a$  – эффективная площадь антенны,  $\eta$  – коэффициент использования поверхности антенны.

Как было сказано выше, РЛС УВД могут функционировать в двух основных режимах: режим обнаружения целей и режим сопровождения целей.

Результаты расчетов по формулам 1-9 сведены в таблицы 2 и 3.

Выполнения третьего этапа предложенного метода оценивания самолетопотоков на аэродромах для обеспечения безопасного движения воздушных судов заключается в комплексном анализе таблиц 1, 2 и 3 и распознавании режимов функционирования РЛС УВД, и, следовательно, формировании выводов о параметре самолетотка аэродрома.

При анализе таблиц 1, 2 и 3 можно сделать вывод о том, что смена режимов функционирования РЛС проявляется через изменение таких параметров сигналов как: несущая частота, ширина спектра, длительность импульса, период следования импульсов. При переходе РЛС УВД в режим «Сопровождение целей», проявляются следующие признаки:

- сужение диаграммы направленности антенны (видно по результатам расчета угла раскрыва диаграммы направленности антенны);
- повышение разрешающей способности РЛС (видно по результатам расчета разрешающих способностей РЛС);
- уменьшение минимальной дальности действия РЛС (видно по результатам расчета дальности действия РЛС).

Таким образом, по изменениям параметров

сигналов РЛС УВД, в рамках предложенного метода можно формировать выводы о самолетопотоках аэродромов.

### Заключение

В статье рассмотрен радиомониторинговый метод оценивания параметров самолетопотоков на аэродромах для обеспечения безопасного движения воздушных судов. Метод основан на выявлении изменений режимов функционирования РЛС УВД. В статье представлены характеристики типовых взлетно-посадочных радаров, используемых муниципальными аэропортами США. Рассмотрены следующие радары: ASR-9, ASR-11, Hi-PAR.

В статье показано, что смена режимов функционирования РЛС проявляется через изменение следующих параметров сигналов: несущей частоты, ширины спектра, длительности импульса, периода следования импульсов. На основании изменений параметров сигналов РЛС УВД формируются выводы о параметре самолетопотоков аэродромов, что в свою очередь может являться предпосылкой к обеспечению решения задач, связанных с повышением безопасности движения воздушных судов.

### Литература

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. М.: Связь, 1972. 336 с.
2. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы. Справочник. М.: Радиотехника, 2007. 515 с.
3. ГОСТ Р 8.736–2011. Измерения прямые многократные. М.: Стандартинформ, 2013. 19 с.
4. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Юнити, 2004. 573 с.

Таблица 2

Результаты обработки результатов измерений РЛС УВД при радиоизлучениях в режиме обнаружения целей

Наименование РЛС	Частота, МГц	$\Delta X, м$	$\Delta Y, м$	$\Delta V, км/с$	$Q_x, град$	$Q_y, град$	Коэф усиления, дБ	Мин дальность действия, км	Макс дальность действия, км
ASR-9	2700	0,272	3,75	55,517	1,298	2,356	40,383	0,150	125
ASR-11	2700	0,272	3,75	55,517	1,298	2,356	40,383	0,150	150
Hi-PAR	8000	0,088	1,667	9,369	0,457	0,537	51,344	0,075	42,9

Таблица 3

Результаты обработки результатов измерений РЛС УВД при радиоизлучениях в режиме сопровождения целей

Наименование РЛС	Частота, МГц	$\Delta X, м$	$\Delta Y, м$	$\Delta V, км/с$	$Q_x, град$	$Q_y, град$	Коэф усиления, дБ	Мин дальность действия, км	Макс дальность действия, км
ASR-9	2900	0,253	1,875	51,688	1,209	2,194	41,004	0,150	125
ASR-11	2900	0,253	1,875	51,688	1,209	2,194	41,004	0,150	150
Hi-PAR	12000	0,059	0,938	6,246	0,305	0,358	54,866	0,075	42,9

УДК 621.37

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ

## INVESTIGATION OF THE ACCURACY OF OPERATION OF THE ORBITAL GROUP OF OBSERVATIONS OF SPACE OBJECTS BY THE TRIANGULATION METHOD

**Олег Игоревич Атакищев**

почетный работник науки и высоких технологий РФ  
доктор технических наук, профессор  
заместитель генерального директора  
по специальным проектам  
АНО «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: aoi007@mail.ru

**Евгений Николаевич Белихин**

кандидат технических наук  
старший инженер учебной лаборатории  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (981) 731-58-80  
E-mail: belihin.en@gmail.com

**Анатолий Иванович Мухин**

кандидат технических наук  
преподаватель 55 кафедры  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7(965) 011 44 65  
E-mail: tolik516@yandex.ru

**Дмитрий Павлович Павленко**

преподаватель 55 кафедры  
ВКА имени А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13

### Аннотация

Представлены аналитические зависимости погрешности определения положения космического объекта от точностных характеристик бортовой аппаратуры космических аппаратов-наблюдателей. Получены значения погрешности, рассчитанные по полученным выражениям на основе реальных значений параметров системы. Приводятся графики, построенные на основании предложенных выражений. Сделаны выводы о влиянии отдельных параметров орбитальной группировки на точность измерений.

**Ключевые слова:** космическая триангуляция, погрешность измерений, наблюдение за космическими объектами.

### Summary

Analytical dependences of the error in determining the position of a space object on the accuracy characteristics of the onboard equipment of spacecraft-observers are presented. Error values are obtained, calculated from the obtained expressions based on the actual values of the system parameters. Graphs constructed on the basis of the proposed expressions are given. Conclusions are drawn about the influence of individual parameters of the orbital grouping on the measurement accuracy.

**Keywords:** space triangulation, measurement error, observation of space objects.

### Введение

В последние годы существенно повышается актуальность решения задачи наблюдения за малогабаритными космическими объектами, такими, как малые космические аппараты микро- и нано- классов, космический мусор и т.п. Перспективным вариантом решения данной задачи является использование космической системы наблюдения, предложенной и подробно описанной в работах [1,2]. Данная космическая система предполагает наличие на круговой солнечно-синхронной орбите орбитальной группировки из нескольких космических аппаратов-наблюдателей (КАН) [2]. На каждом КАН расположены

минимум по два оптико-электронных устройства, направленных таким образом, что их поля зрения пересекаются, образуя тем самым зоны двойного обзора. В таких зонах, с помощью метода космической триангуляции, определяется расстояние от КАН до космического объекта, на основе которого впоследствии рассчитываются параметры орбиты наблюдаемого объекта. Однако, как и любое измерение, расстояние определяется с некоторой погрешностью. Погрешность определения расстояния от КАН до космического объекта, как показано в литерату-

ре [2] зависит от точностных характеристик оптико-электронной аппаратуры и от погрешности определения положения самих КАН.

В известных работах по данной тематике не рассмотрено влияние:

- погрешности оптико-электронных средств [2];
- погрешности определения положения КАН [3,4].

Таким образом, общее влияние перечисленных погрешностей на точность определения параметров движения космических объектов в полной мере не исследовалось. А известные аналитические выражения, отражающие данную зависимость, требуют более детального рассмотрения.

### Исходные данные и постановка задачи исследования

За основу орбитальной системы принята система, описанная в работе [1]. Данная система состоит из восьми КАН, расположенных на круговой орбите на равном угловом расстоянии друг от друга. В связи с этим достаточно рассмотреть измерительный треугольник, образованный двумя КАН и попавшим в зону двойного обзора космическим объектом (рисунком 1).

На рисунке 1 указаны:

$b$  – базис (расстояние между КАН1 и КАН2, участвующими в построении измерительного треугольника);

углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы между базисом и направлением на космический объект (КО);

$\Delta b$  – погрешность определения базиса;

$\Delta\alpha$  – угловая погрешность измерения оптико-электронных средств;

$R$  – действительное расстояние между КАН и наблюдаемым космическим объектом;

$R_{\square}$  – расстояние между КАН и наблюдаемым космическим объектом с учетом  $\Delta\alpha$ ;

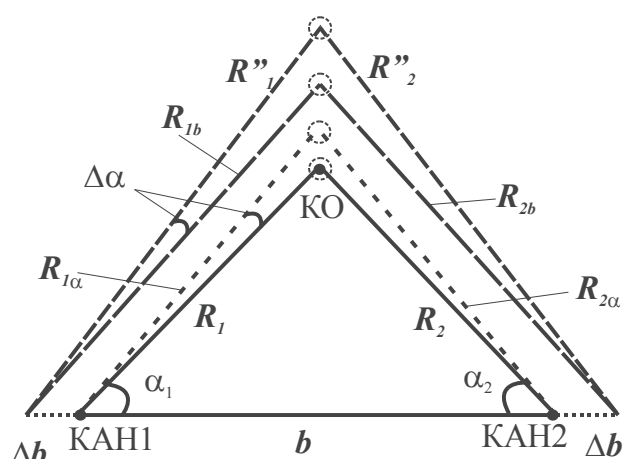


Рис. 1. Измерительный треугольник

$R_b$  – расстояние между КАН и наблюдаемым космическим объектом с учетом  $\Delta b$ ;

$R_{\square}$  – расстояние между КАН и наблюдаемым космическим объектом с учетом  $\Delta b$  и  $\Delta\alpha$ .

Требуется вывести аналитические выражения, для расчета погрешности определения расстояния до наблюдаемого объекта с учетом погрешностей  $\Delta b$  и  $\Delta\alpha$ . Построить графики и исследовать зависимости погрешности определения расстояния до космического объекта от указанных факторов.

### Математическая модель зависимости погрешности определения расстояния до космического объекта от погрешностей $\Delta b$ и $\Delta\alpha$

Расстояние от КАН до КО, согласно методу космической триангуляции [2], определяется по формуле

$$R_1 = \frac{b \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)};$$

$$R_2 = \frac{b \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}.$$
(1)

Из-за несовершенства оптико-электронной аппаратуры углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  определяются с погрешностью  $\Delta\alpha$ , что приводит к изменению выражения в скобках функции  $\sin$ . Для расчета погрешности  $\Delta R_{1\alpha}$ , необходимо из расстояния  $R_{1\alpha}$  вычесть  $R$  применительно к соответствующим КАН:

$$\Delta R_{1\alpha} = R_{1\alpha} - R_1 = b \left( \frac{\sin(\alpha_2 + \Delta\alpha)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2 + 2\Delta\alpha)} - \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \right);$$

$$\Delta R_{2\alpha} = R_{2\alpha} - R_2 = b \left( \frac{\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2 + 2\Delta\alpha)} - \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \right).$$
(2)

В работе [2] принимается допущение о равенстве синуса малого угла нулю, в результате чего сделан вывод об отсутствии влияния угловой ошибки на итоговую погрешность вычисления расстояния. Однако, учитывая большое значение базиса, данное допущение является очень грубым.

Для расчета погрешности  $\Delta R_b$ , равной разности  $R_b$  и  $R$ , воспользуемся выражением

$$\Delta R_{1b} = (b + 2\Delta b) \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} - b \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} = 2\Delta b \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)};$$

$$\Delta R_{2b} = (b + 2\Delta b) \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} - b \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} = 2\Delta b \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}.$$
(3)

При увеличении значения ошибки  $\Delta b$ , погрешность  $\Delta R_b$  линейно увеличивается.

Аналогично выражениям (2) и (3) получено выражение для расчета итоговой погрешности  $\Delta R''$ , учитывающей как ошибку  $\Delta b$ , так и ошибку  $\Delta\alpha$

$$\Delta R''_1 = (b + 2\Delta b) \frac{\sin(\alpha_2 + \Delta\alpha)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2 + 2\Delta\alpha)} - b \frac{\sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)};$$

$$\Delta R''_2 = (b + 2\Delta b) \frac{\sin(\alpha_1 + \Delta\alpha)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2 + 2\Delta\alpha)} - b \frac{\sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}.$$
(4)

Выражение (4) совмещает в себе особенности формул (2) и (3).

### Расчет значений погрешности $\Delta R$ и получение зависимости погрешности $\Delta R$ от ошибок $\Delta b$ и $\Delta \alpha$

Полученные выше формулы позволяют с легкостью рассчитать конкретные величины погрешности  $\Delta R$  для выбранных значений базы и углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Для примера рассмотрена орбитальной группировка, в которой два КАН расположены на расстоянии 16000 км друг относительно друга. В поле зрения оптико-электронных средств, расположенных на борту рассматриваемых КАН зафиксирован космический объект на угловом расстоянии  $\alpha_1 = \alpha_2 = 40^\circ$  от базы. В таблице 1 приведены значения погрешностей определения расстояния от КАН до наблюдаемого объекта для различных значений ошибок  $\Delta b$  и  $\Delta \alpha$ .

Проанализировав данные, приведенные в таблице 1, сделан ряд выводов. Во-первых, итоговая погрешность  $\Delta R$  превышает сумму погрешностей  $\Delta R_b$  и  $\Delta R_\alpha$ , что подтверждает перекрестное влияние ошибок  $\Delta b$  и  $\Delta \alpha$  друг на друга. Во-вторых, если погрешность  $\Delta R_b$  при увеличении ошибки  $\Delta b$  в два раза также увеличилась в два раза, то при увеличении ошибки  $\Delta \alpha$  с 3 до 6 угловых секунд, погрешность  $\Delta R_\alpha$  увеличилась с 63,69 метров до 212,31 метров, что более, чем в 3 раза. Следовательно, итоговая погрешность измерений более чувствительна к изменению точности оптико-электронной аппаратуры, чем к изменению ошибки определения расстояния между КАН.

В работе [2] рассматривается пример определения расстояния от КАН до космического объекта, при условии, что измерительный тре-

угольник является прямоугольным и равнобедренным. Для такого треугольника углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  равны между собой и равны сорока пяти градусам. Стоит заметить, что такие параметры измерительного треугольника являются частным случаем и не могут в полной мере описать изменение погрешности определения расстояния между КАН и наблюдаемым объектом. На рисунке 2 приведены зависимости погрешности  $\Delta R$  от угловой ошибки измерений оптико-электронных средств и ошибки определения базы, при значении  $b = 16000$  км.

Как видно из рисунка 2, при увеличении значений ошибок  $\Delta b$  и  $\Delta \alpha$ , величина погрешности определения расстояния до объекта наблюдения линейно возрастает. Кроме того, так как треугольник равнобедренный, то все представленные на рисунке 2 погрешности одинаковы для обоих КАН. Следовательно, для более глубокого анализа решаемой задачи, необходимо рассмотреть измерительный треугольник с различными ребрами  $R_1$  и  $R_2$ .

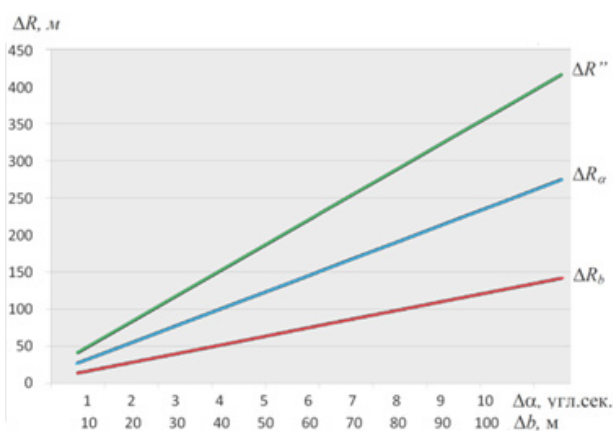


Рис. 2. Зависимости  $\Delta R_b(\Delta b)$ ;  $\Delta R_\alpha(\Delta \alpha)$ ;  $\Delta R''(\Delta \alpha, \Delta b)$

**Таблица 1**  
Погрешность определения расстояния от КАН до наблюдаемого объекта

№ п/п	$b$ , км	$\alpha_1 = \alpha_2$ , град	$\Delta b$ , м	$\Delta \alpha$ , угл. сек.	$\Delta R_b$ , м	$\Delta R_\alpha$ , м	$\Delta R''$ , м
	16000	40	50	3	65,27	63,69	128,97
				4		127,38	192,67
				5		106,15	171,43
				6		212,31	277,59
			100	3	130,54	63,69	194,24
				4		127,38	257,93
				5		106,15	236,70
				6		212,31	342,87

На *рисунке 3* приведены зависимости  $\Delta R(\Delta\alpha, \Delta b)$ , при значении углов  $\alpha_1=70^\circ, \alpha_2=30^\circ$ .

В отличие от *рисунка 2*, где погрешности  $\Delta R_1$  и  $\Delta R_2$  совпадают, на *рисунке 3* представлены шесть зависимостей, по три для каждого КАН. Для стороны треугольника, расположенной напротив угла  $30^\circ$  (в рассматриваемом случае стороны  $R_1$ ), погрешность, зависящая от точности оптико-электронной аппаратуры, значительно превышает соответствующую погрешность для стороны  $R_2$ . В свою очередь, график изменения погрешности  $\Delta R_{1b}$  наоборот находится ниже графика  $\Delta R_{2b}$ . В первом случае это обусловлено тем, что функция синус в области  $70^\circ$  более пологая, чем в области  $30^\circ$ . Поэтому при увеличении угла на значение  $\Delta\alpha$ , погрешность возрастает сильнее для угла  $\alpha=30^\circ$ .

Что касается погрешности  $\Delta R_b$ , значение синуса большего угла является большим. Соответственно и погрешность вычисления стороны, расположенной напротив этого угла также будет больше.

Полученные графики позволяют оценить значение погрешности  $\Delta R$ . При имеющихся требованиях к точности определения параметров движения космического объекта, с помощью графиков можно определить удовлетворяет ли система данным требованиям. Кроме того полученные результаты позволяют сравнить влияние различных факторов на итоговую погрешность измерений.

### Заключение

Погрешность определения с помощью метода космической триангуляции расстояния между КАН и наблюдаемым космическим объектом (малым космическим аппаратом, космическим

мусором)  $\Delta R''$  зависит в первую очередь от двух параметров: угловой ошибки оптико-электронных приборов, расположенных на борту КАН, и погрешности определения расстояния между двумя КАН, образующими измерительный треугольник.

В статье получены аналитические выражения для расчета погрешности  $\Delta R''$ , а так же выражения для расчета погрешностей  $\Delta R_b$  и  $\Delta R_a$ . С помощью полученных выражений рассчитаны значения погрешности для реальных величин ошибок  $\Delta b$  и  $\Delta\alpha$ . На основе данных значений сделан предварительный вывод о чувствительности погрешности  $\Delta R''$  от изменения параметров  $\Delta b$  и  $\Delta\alpha$ . Построены графики зависимостей  $\Delta R(\Delta\alpha, \Delta b)$ . На основе анализа графиков  $\Delta R(\Delta\alpha, \Delta b)$ , сделаны выводы о влиянии углов между базой и направлением на наблюдаемый объект на точность измерений.

Полученные результаты могут быть использованы для обоснования требований к параметрам оптико-электронной аппаратуры и к точности определения положения КАН в пространстве. Кроме того, материалы, представленные в статье, позволяют продолжить работу в области исследования изменения погрешности  $\Delta R$  в зависимости от зоны двойного обзора, в которой пересекаются поля зрения оптико-электронной аппаратуры.

### Литература

1. Семенихин В.К. и др. Вариант баллистического построения орбитальной системы контроля космических объектов в ближней зоне околоземного космического пространства // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. № 646. С.112-116.
2. Половников В.И., Скутницкий В.М. Теоретические основы проектирования орбитальных систем космической триангуляции: монография. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 123 с.
3. Белихин Е.Н., Мингалиев Э.Р. Расчет допустимых точностных параметров оптико-электронных средств космических аппаратов наблюдения космической обстановки // Оборонный комплекс. М.: ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»», 2018. №4. С.32-34.
4. Арсеньев В.Н., Балувев С.Ю., Белихин Е.Н., Ядренкин А.А. Оценивание характеристик точности определения координат космического объекта бортовыми оптико-электронными средствами космических аппаратов наблюдения за обстановкой в космическом пространстве // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. № 666. С.173-179.

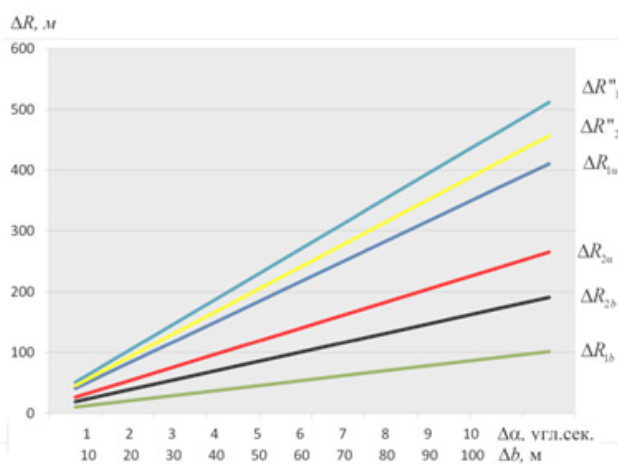


Рис. 3. Зависимость  $\Delta R(\Delta\alpha, \Delta b)$ , при  $\alpha_1=70^\circ$

УДК 621.391

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОСОВОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРИ КВАДРАТУРНОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ В ПРИЕМНЫХ МОДУЛЯХ КАНАЛОВ РАДИОМОНИТОРИНГА

## USE OF BAND SAMPLING AT QUADRATURE SIGNAL PROCESSING IN RECEIVING MODULES OF RADIO MONITORING CHANNELS

**Андрей Алексеевич Афанасьев**

доктор технических наук, доцент  
сотрудник  
ФГКВОУВО «Академия ФСО РФ»  
Адрес: г. Орел, ул. Приборостроительная, д. 35  
E-mail: fromnet@yandex.ru

**Александр Юрьевич Любко**

кандидат технических наук  
сотрудник  
ФГКВОУВО «Академия ФСО РФ»  
E-mail: pustur@yandex.ru

**Александр Викторович Будяков**

сотрудник  
ФГКВОУВО «Академия ФСО РФ»

### Аннотация

В работе рассматриваются варианты использования полосовой дискретизации в приемных модулях системы радиосвязи. Приводится расчет спектра сигналов, анализируются используемые принципы обработки. Предлагаются технические решения по обработке сигналов на основе использования полосовой дискретизации.

**Ключевые слова:** полосовая дискретизация, спектр сигнала, цифровая обработка сигналов, наложение спектров.

### Summary

In paper, options of band sampling using in receiving system modules of a radio communication are considered. Calculation of a range of signals is given, the used principles of processing are analyzed. Technical solutions on signal processing on the basis of band sampling using are proposed.

**Keywords:** band sampling, signal spectrum, digital signal processing, imposing of spectrums.

В настоящее время принципы цифровой обработки квадратурных составляющих сигнала являются основой для функционирования приемных модулей радиоканалов [1]. По сути, демодулятор выполняет задачу приема сигналов переданных по неидеальному, ограниченному по полосе, каналу с аддитивным белым шумом, как правило, в условиях наличия межсимвольной интерференции, многолучевого распространения и замираний.

Одной из проблем, возникающих при квадратурной обработке сигналов в приемных устройствах, является сложность формирования объемного потока высокоскоростных данных с целью процедуры переноса спектра из диапазона высокочастотной несущей в область спектра полезного сигнала.

Дискретизация сигналов и процессов практически любой природы во времени в сочетании с их квантованием по уровню лежит в ос-

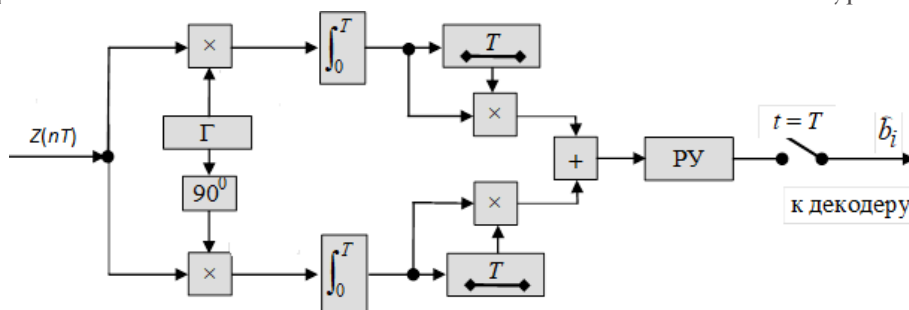


Рис. 1. Схема квадратурной обработки при приеме сигналов ОФМ

нове их цифровой обработки [2]. Несоблюдение условий теоремы В.А. Котельникова является крайне критичным и сопровождается либо неадекватным преобразованием данных с соответствующими погрешностями и ошибками, либо необоснованным введением информационной избыточности с соответствующим завышением требований по составу средств, их качеству и ресурсным затратам.

Общий подход для реализации принципов квадратурной обработки при приеме сигналов ОФМ показан на *рисунке 1* и подробно описан в [1].

Оптимизация выбора частоты дискретизации исходных процессов и сигналов позволяет обеспечить компромиссные условия между противоречивыми факторами объема и точности представления данных, что и является одной из ключевых задач на пути аналого-цифрового преобразования данных и их последующей обработки [3]. Специфика преобразования и обработки информации, как и особенности преобразовываемых исходных процессов и сигналов, должны непосредственно учитываться при дис-

кретизации. Но именно это и определяет сложность проблемы выбора параметров.

Учитывая вышеизложенное, предлагается осуществлять цифровизацию непрерывных полосовых сигналов, центральные частоты которых отличны от нуля, на основе использования метода полосовой дискретизации. Когда ширина спектра и центральная частота непрерывного входного сигнала позволяют, полосовая дискретизация не только дает возможность снизить требуемое быстродействие АЦП по сравнению с традиционной низкочастотной дискретизацией, но и уменьшает объем памяти, необходимый для хранения сигнала на заданном интервале [4].

В качестве альтернативы полосовой дискретизации можно было бы воспользоваться комплексным понижающим преобразованием, однако такой подход предполагает предварительную дискретизацию с высокочастотных составляющих сигнала с последующей их интерполяцией [4]. Таким образом, более предпочтительным видом преобразования для использования в приемных модулях каналов радиомониторинга при квадратурной обработке сигналов явля-

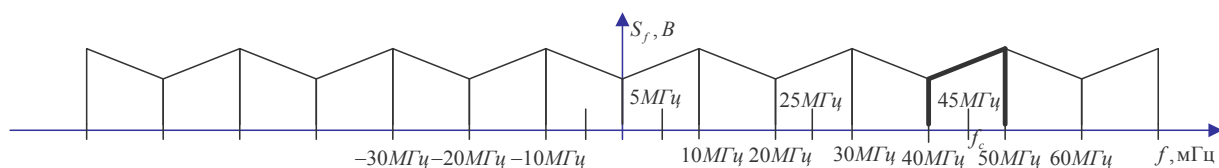


Рис. 2. Спектр сигнала при частоте дискретизации 20 МГц

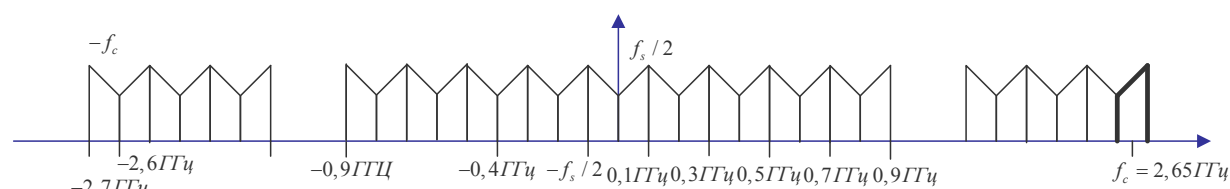


Рис. 3. Спектр сигнала при частоте дискретизации 0,2 ГГц

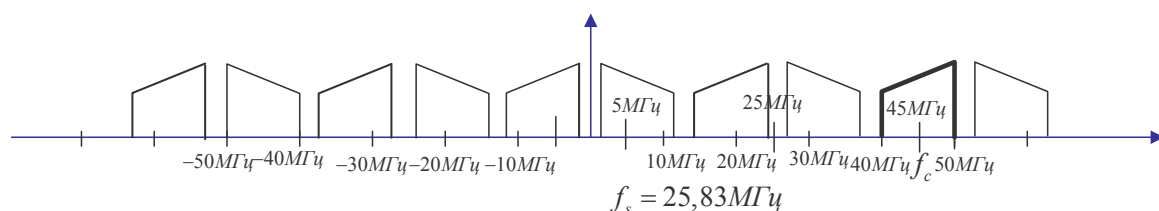


Рис. 4. Спектр сигнала при частоте дискретизации 25,833 МГц

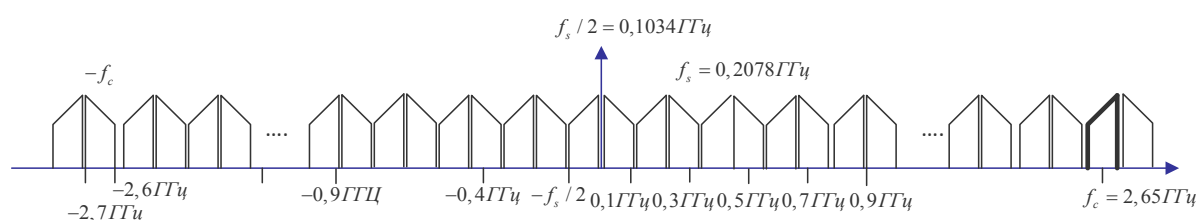


Рис. 5. Спектр сигнала при частоте дискретизации 0,2078 ГГц

ется использование полосовой дискретизации.

Рассмотрим предлагаемые технические решения более подробно. В качестве примера по обработке принимаемых сигналов рассмотрим диапазон частот, принимаемых в каналах радиомониторинга 40-50 МГц и 2,6-2,7 ГГц. Центральную частоту для этих сигналов обозначим  $f_{c1}=45$  МГц и  $f_{c2}=2,65$  ГГц. Ширина спектров сигналов  $B_1=10$  МГц,  $B_2=0,1$  ГГц. В соответствии с критерием Найквиста частота дискретизации должна быть больше удвоенной ширины спектра сигнала  $f_s \geq 2B$ . То есть частота дискретизации должна быть  $f_{s1} \geq 20$  МГц,  $f_{s2} \geq 0,2$  ГГц. При полосовой дискретизации выполняется оцифровка и перенос по частоте как один процесс, который часто называют дискретизирующим переносом. Минимальная частота дискретизации, при которой отсутствуют наложения рассчитывается в соответствии с:

$$f_s = (f_c - B/2) / m + (f_c + B/2) / (m+1), \quad (1)$$

где  $R_{\text{int}} \leq (f_c + (B/2)) / B < R_{\text{int}} + 1$ .

Для первого сигнала  $R_{\text{int}} \leq 5 < R_{\text{int}} + 1$ , то есть  $R_{\text{int}} = 5$ ,  $f_{s1\text{min}} = 20$  МГц.

Для второго сигнала  $R_{\text{int}} \leq 27 < R_{\text{int}} + 1$ , то есть  $R_{\text{int}} = 27$ ,  $f_{s2\text{min}} = 0,2$  ГГц.

Таким образом, сигнал с полосой частот 40-50 МГц необходимо подвергать полосовой дискретизации с частотой  $f_{s1\text{min}} = 20$  МГц. При этом число копий исходного сигнала  $m=4$ . Спектр получаемого после дискретизации сигнала изображен на рисунке 2.

Сигнал с полосой частот 2,6-2,7 ГГц необходимо подвергать полосовой дискретизации с частотой  $f_{s2} = 0,2$  ГГц. При этом число копий исходного сигнала  $m=26$ . Спектр получаемого после дискретизации сигнала изображен на рисунке 3. Полосовая дискретизация производит оцифровку и перенос по частоте как один процесс, который называется дискретизирующим переносом. При этом спектр сигнала после процедуры дискретизации можно наблюдать на частоте от 0 до 10 МГц в первом случае и от 0 до 0,1 ГГц во втором.

Эти два случая можно было использовать при идеальных полосовых фильтрах и стабильности генераторов тактовых сигналов частоты дискретизации, что на практике в приемных модулях каналов радиомониторинга выполнить весьма затруднительно [5]. Поэтому целесообразно брать частоту дискретизации из середины поло-

сы допустимых частот рассчитанную по:

$$f_s = (f_c - B/2) / m + (f_c + B/2) / (m+1), \quad (2)$$

где для первого случая  $m_1=3$ , для второго случая  $m_2=25$ .

В этом случае  $f_{s1}=25,833$  МГц, а  $f_{s2}=0,2078$  ГГц.

Спектр полосового сигнала  $f_{c1}=45$  МГц с частотой дискретизации  $f_{s1}=25,833$  МГц изображен на рисунке 4.

Спектр полосового сигнала  $f_{c2}=2,65$  ГГц с частотой дискретизации  $f_{s2}=0,2078$  ГГц изображен на рисунке 5.

Подобные технические решения по выбору частоты дискретизации дают возможность использовать физически реализуемые фильтры, имеющие граничные значения полос расфильтровки, и создают предпосылки формирования границ допустимых значений частот защитных полос по сторонам полосы пропускания фильтра. В результате становится возможным устранить потенциально возможное наложение спектров, возникающее в связи с несовершенством избирательных цифровых фильтров осуществляющих выделение требуемой полосы частот обрабатываемого сигнала.

Таким образом, использование полосовой дискретизации при квадратурной обработке сигналов в приемных модулях каналов радиомониторинга дает возможность уменьшить требуемые частоты дискретизации, а следовательно, упростить требования к быстродействию аналого-цифровых преобразователей и, соответственно, уменьшить требуемый для хранения данных объем памяти.

### Литература

1. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
2. Айфичер Э.С. Цифровая обработка сигналов: практический подход: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2004. 992 с.
3. Афанасьев А.А. Цифровая обработка сигналов / А.А. Афанасьев, А.А. Рыболовлев, А.П. Рыжков. Учеб. пособие. Москва: Горячая линия-Телеком, 2017. 356 с.
4. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. М.: БИНОМ, 2006. 656 с.
5. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB. Учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 816 с.



УДК 621.391.8

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДИСКРЕТНОЙ ЦЕПИ

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR IDENTIFYING THE TRANSFER FUNCTION OF A DISCRETE CIRCUIT

**Сергей Леонидович Ремизов**

кандидат технических наук

старший преподаватель

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СГУТиИ)

Адрес: 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86

Тел.: +7 (913) 894-65-88

E-mail: selere1@yandex.ru

**Елена Викторовна Дежина**

старший преподаватель

СГУТиИ

E-mail: alenda@ngs.ru

**Юлия Сергеевна Черных**

старший преподаватель

СГУТиИ

E-mail: ylia\_chernich@mail.ru

### Аннотация

В работе рассмотрены методы идентификации передаточной функции неизвестной системы методом наименьших квадратов и методом на основе известных отсчетов входного и выходного сигналов. Приведены сравнительные результаты при идентификации передаточной функции цепи второго порядка.

**Ключевые слова:** передаточная функция, амплитудно-частотная характеристика, импульсная характеристика, идентификация, нули и полюсы передаточной функции, погрешность.

### Summary

The methods for determining the transfer function of an unknown system by the least squares method and the method based on known samples of input and output signals is considered. A comparison of the results of identification of transfer functions the circuit of the second order is made various methods is made.

**Keywords:** transfer function, amplitude-frequency response, impulse response, identification, zero and poles of the transfer function, error.

### Введение

Выравнивание частотных характеристик канала можно осуществить с помощью корректирующего устройства с передаточной функцией, обратной передаточной функции канала. В связи с этим возникает задача определения передаточной функции канала связи. Сложность задачи состоит в том, что неизвестны не только параметры передаточной функции, но и ее вид.

Все существующие методы идентификации передаточной функции, описывающей линейную стационарную модель, можно разделить на две основные группы: параметрические и непараметрические [1]. В параметрических методах структура модели задана заранее, в результате процедуры оценивания определяют значения коэффициентов дробно-рациональной функции. Наиболее распространенным методом параметрического оценивания является метод наименьших квадратов, который, в числе прочих, широко применим и при выполнении адаптивного моделирования [2].

В непараметрических методах определение передаточной функции осуществляется без первоначального выделения ограниченного множества возможных моделей и реализуется с помощью временных или частотных методов. Непараметрическим методом является метод определения параметров передаточной функции идентифицируемой системы по входному и выходному сигналам канала связи [3].

Целью работы является сравнительный анализ указанных методов идентификации передаточной функции по критерию максимальной точности определения коэффициентов передаточной функции при минимальных вычислительных затратах.

### 1. Идентификация системы методом адаптивного моделирования

В качестве объекта идентификации выступает БИХ-фильтр нижних частот второго порядка с характеристикой Баттерворта, передаточная функция которого имеет вид

$$H_c(z) = \frac{0.175z^{-1}}{1 - 1.318z^{-1} + 0.493z^{-2}}. \quad (1)$$

Канал связи представим в виде рекурсивной цепи с передаточной функцией

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{l=0}^L a_l z^{-l}}{1 - \sum_{l=1}^L b_l z^{-l}} = \frac{A(z)}{B(z)}. \quad (2)$$

При идентификации неизвестной системы методом адаптивного моделирования целевой функцией может служить математическое ожидание квадратичного значения сигнала ошибки, или рабочая функция. Моделирование передаточной функции неизвестной системы рекурсивной дискретной цепью на основе рабочей функции показало, что точность воспроизведения амплитудно-частотной характеристики цепи зависит от вида и порядка заданной модели [4]. Рассмотрим адаптивное моделирование методом наименьших квадратов, где в качестве целевой функции выступает квадрат сигнала ошибки ( $\varepsilon^2$ ).

Идентификация системы методом наименьших квадратов выполняется по следующему алгоритму [1]:

$$\begin{aligned} y_k &= \sum_{n=0}^L a_n x_{k-n} + \sum_{n=1}^L b_n y_{k-n} = W_k^T U_k; \\ W_k &= [a_{0k} \dots a_{Lk} \ b_{1k} \dots b_{Lk}]^T; \\ U_k &= [x_k \ x_{k-1} \dots x_{k-L} \ y_{k-1} \dots y_{k-L}]^T; \\ \varepsilon_k &= d_k - y_k = d_k - W_k^T U_k; \\ \hat{\nabla}_k &= \frac{\partial \varepsilon_k^2}{\partial W_k} = -2\varepsilon_k [\alpha_{0k} \dots \alpha_{Lk} \ \beta_{1k} \dots \beta_{Lk}]; \\ W_{k+1} &= W_k - M \hat{\nabla}_k, \end{aligned}$$

где  $L$  – порядок БИХ-фильтра;

$y_k$  – выходной сигнал адаптивного БИХ-фильтра;

$W_k$  – вектор весовых коэффициентов БИХ-фильтра;

$U_k$  – вектор входного сигнала;

$\varepsilon_k$  – ошибка;

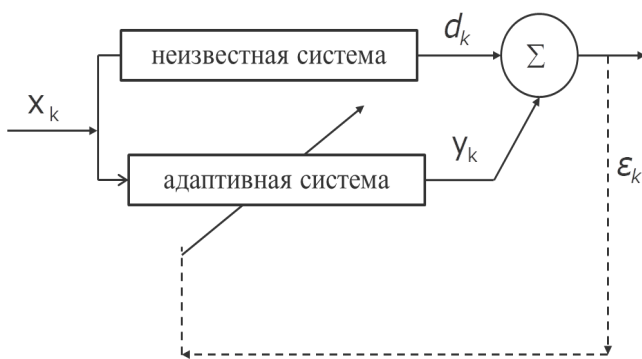


Рис. 1. Схема идентификации неизвестной системы

$\hat{\nabla}_k$  – оценка градиента квадрата ошибки  $\varepsilon_k^2$ ;  
 $\alpha_{nk}, \beta_{nk}$  – некоторые параметры, равные:

$$\alpha_{nk} = x_{k-n} + \sum_{l=1}^L b_{lk} \alpha_{n,k-l} \quad (0 \leq n \leq L);$$

$$\beta_{nk} = y_{k-n} + \sum_{l=1}^L b_{lk} \beta_{n,k-l} \quad (1 \leq n \leq L);$$

$M$  – диагональная матрица с параметрами сходимости  $\mu_i$  для коэффициентов  $a_i$  и параметрами сходимости  $\gamma_j$  для коэффициентов  $b_j$ .

Схема идентификации приведена на рисунке 1.

Точность и скорость процесса адаптации зависят от первоначального выбора порядка БИХ-фильтра  $L$ , который задается произвольно перед началом адаптивного моделирования. Выполним идентификацию системы (1), приняв порядок передаточной функцией  $L$  равным двум:

$$H_\phi(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 - b_1 z^{-1} - b_2 z^{-2}}. \quad (3)$$

При выполнении условия  $|\varepsilon_k| \leq 0.05$  (71007 итераций) получена передаточная функция [5] вида

$$H_\phi(z) = \frac{-0.013 + 0.169z^{-1} + 0.069z^{-2}}{1 - 1.147z^{-1} + 0.375z^{-2}}. \quad (4)$$

Если изменить допустимое значение ошибки ( $|\varepsilon_k| \leq 0.01$ ), то за 89775 итераций получена функция

$$H_{\phi_1}(z) = \frac{-0.002 + 0.175z^{-1} + 0.012z^{-2}}{1 - 1.294z^{-1} + 0.477z^{-2}}. \quad (5)$$

Если задать требования к величине ошибки  $|\varepsilon_k| \leq 0.005$ , то за 97022 итерации получим передаточную функцию

$$H_{\phi_2}(z) = \frac{-0.001 + 0.174z^{-1} + 0.005z^{-2}}{1 - 1.308z^{-1} + 0.486z^{-2}}. \quad (6)$$

Дальнейшее увеличение количества итераций приведет к уменьшению значения ошибки  $\varepsilon_k$  и постепенному приближению параметров фильтра к истинным значениям.

## 2. Идентификация системы по входному и выходному сигналам

Идентификация системы по входному и выходному сигналам выполняется по алгоритму, изложенному в [3].

При идентификации цепи, описываемой выражением (1) на ее вход поступают отсчеты входного сигнала  $x(k)$ . Зададим их произвольно:

$$x(k) = [0.5; 0.4; 0.3; 0.2; 0.1]. \quad (7)$$

При этом на выходе цепи будем иметь отсчеты выходного сигнала

$$y(k) = [0.; 0.0875; 0.1853; 0.2536; 0.2779;$$

$$0.2587; 0.2040; 0.1413; 0.0857; \quad (8)$$

$$0.0433; 0.0148; -0.0018; \dots]$$

Сформируем матрицу отсчетов входных сигналов  $[X]$  размером  $12 \times 12$ :

$$[X] = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Матрица-столбец выходных сигналов  $[Y]$  будет иметь вид

$$[Y] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0875 \\ 0.1853 \\ 0.2536 \\ \dots \\ 0.0148 \\ -0.0018 \end{bmatrix} \quad (10)$$

С помощью матриц  $[X]$  и  $[Y]$  определим импульсную характеристику цепи

$$h(k) = [0; 0.175; 0.2306; 0.2177; 0.1733; 0.1209; 0.0741; 0.0379; 0.0136; -0.0008; -0.0079; -0.0098]. \quad (11)$$

Поскольку данный метод идентификации позволяет определить не только параметры неизвестной системы, но и ее порядок, то изначально зададим его заведомо большим, например,  $p=4$ . Из отчетов импульсной характеристики  $h(k)$  составляем прямоугольную матрицу размером  $(p+1) \times (N - (p+1))$ , то есть  $5 \times 7$ :

$$[T_4] = \begin{bmatrix} 0 & 0.175 & 0.2306 & 0.2177 & 0.1733 & 0.1209 & 0 \\ 0.175 & 0.2306 & 0.2177 & 0.1733 & 0.1209 & 0.0741 & 0 \\ 0.2306 & 0.2177 & 0.1733 & 0.1209 & 0.0741 & 0.0379 & 0 \\ 0.2177 & 0.1733 & 0.1209 & 0.0741 & 0.0379 & 0.0136 & 0 \\ 0.1733 & 0.1209 & 0.0741 & 0.0379 & 0.0136 & -0.0008 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Определяем корреляционную матрицу  $R_4$  и обратную ей  $R_4^{-1}$  по формуле

$$R_4^{-1} = [ [T_4] \times [T_4]^T ]^{-1} = \begin{bmatrix} 1.14 \cdot 10^7 & -2.16 \cdot 10^7 & -8.57 \cdot 10^5 & 1.82 \cdot 10^7 & 0.3692 \\ -2.16 \cdot 10^7 & 4.25 \cdot 10^7 & -3.30 \cdot 10^6 & -3.07 \cdot 10^7 & -0.2899 \\ -8.57 \cdot 10^5 & -3.30 \cdot 10^6 & 1.32 \cdot 10^7 & -1.13 \cdot 10^7 & -0.6216 \\ 1.82 \cdot 10^7 & -3.07 \cdot 10^7 & -1.13 \cdot 10^7 & 3.67 \cdot 10^7 & 0.0957 \\ 0.3692 & -0.2899 & -0.6216 & 0.0957 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Элементы последней строки (справа налево), или последнего столбца (снизу вверх) матрицы  $R_4^{-1}$  соответствуют коэффициентам полинома

$$B(z) = 1 + 0.0957z^{-1} - 0.6216z^{-2} - 0.2899z^{-3} + 0.3692z^{-4}. \quad (14)$$

Для определения коэффициентов полинома числителя передаточной функции  $H(z)$  составляем нижнюю треугольную матрицу  $[E_p]$  размером  $(p+1) \times (p+1)$ , то есть  $5 \times 5$ , из отсчетов импульсной характеристики  $h(k)$ :

$$[E_4] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.175 \\ 0 & 0 & 0 & 0.175 & 0.2306 \\ 0 & 0 & 0.175 & 0.2306 & 0.2177 \\ 0 & 0.175 & 0.2306 & 0.2177 & 0.1733 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Далее умножаем (15) на матрицу-столбец, составленную из коэффициентов  $[b_4]$  полинома знаменателя системной функции

$$[a_4] = [E_4] \times [b_4] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.175 \\ 0.2473 \\ 0.131 \\ 6.043 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Пренебрегая в (16) коэффициентом  $a_4$ , имеющим малое значение, с учетом (14) составляем математическую модель передаточной функции цепи

$$H(z) = \frac{0.175z^{-1} + 0.2473z^{-2} + 0.131z^{-3}}{1 + 0.0957z^{-1} - 0.6216z^{-2} - 0.2899z^{-3} + 0.3692z^{-4}}. \quad (17)$$

Для установления истинного порядка передаточной функции модели определяем нули и полюсы передаточной функции полученной модели (17):

нули:  $z_{01} = 0$ ,  $z_{02,03} = -0.7066 \pm j0.4993$ ;  
полюсы:  $z_{x1,x2} = 0.659 \pm j0.2423$ ,  $z_{x3,x4} = -0.7069 \pm j0.4991$ .

Видно, что значения нулей  $z_{02,03}$  практически равно значениям полюсов  $z_{x3,x4}$ . Это указывает на то, что априори взятый порядок  $p=4$  передаточной функции модели на две единицы превосходит порядок передаточной функции реальной цепи. Поэтому необходимо найти вид передаточной функции для истинного порядка  $p=2$ . Для этого из отсчетов импульсной характеристики (11)  $h(k)$  составляем матрицу  $[T_2]$ :

$$[T_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0.175 & 0.2306 & 0.2177 & 0.1733 & 0.1209 & 0.0741 & 0.0379 & 0 \\ 0.175 & 0.2306 & 0.2177 & 0.1733 & 0.1209 & 0.0741 & 0.0379 & 0.0136 & 0 \\ 0.2306 & 0.2177 & 0.1733 & 0.1209 & 0.0741 & 0.0379 & 0.0136 & -0.0008 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Определяем корреляционную матрицу  $R_2 = [T_2] \cdot [T_2]^T$  и обратную ей  $R_2^{-1}$ :

$$R_2^{-1} = \begin{bmatrix} 25.1315 & -22.6217 & 0.4928 \\ -22.6217 & 26.6002 & -1.3178 \\ 0.4928 & -1.3178 & 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Последний столбец (последняя строка) матрицы (19) дают значения коэффициентов полинома знаменателя передаточной функции модели второго порядка:

$$B(z) = 1 - 1.3178z^{-1} + 0.4928z^{-2}. \quad (20)$$

Для определения коэффициентов нерекурсивной части передаточной функции составляем треугольную матрицу  $[A_p]$  размером  $(p+1) \times (p+1)$ , то есть  $(3 \times 3)$ , из отсчетов импульсной характеристики  $h(k)$  и умножаем ее на матрицу – столбец, составленную из коэффициентов полинома знаменателя  $[b_2]$ . В результате определим значения коэффициентов полинома числителя передаточной функции второго порядка:

$$[a_2] = [E_2] \cdot [b_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.175 \\ 0 & 0.175 & 0.2306 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.4928 \\ -1.3178 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.175 \\ -1.5 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Пренебрегая в (21) коэффициентом  $a_2$ , имеющим малое значение по сравнению с  $a_1$ , получаем с учетом (20) передаточную функцию модели второго порядка:

$$H(z) = \frac{0.175z^{-1}}{1 - 1.3178z^{-1} + 0.4928z^{-2}}. \quad (22)$$

### 3. Сравнение результатов моделирования

Сравним временные и частотные характеристики передаточных функций, полученных в результате идентификации системы методом адаптивного моделирования (6)  $H_{\phi 2}(z)$  и идентификации по входному и выходному сигналам (22)  $H(z)$  с характеристиками исходной системы, описываемой выражением (1)  $H_c(z)$ .

Модули относительных погрешностей АЧХ для передаточных функций (6) и (22) определим в процентах по формулам:

$$d1(\Omega) = \left| \frac{H_c(e^{j2\pi\Omega}) - H_{2\phi}(e^{j2\pi\Omega})}{H_c(e^{j2\pi\Omega})} \right| \times 100\%; \quad (23)$$

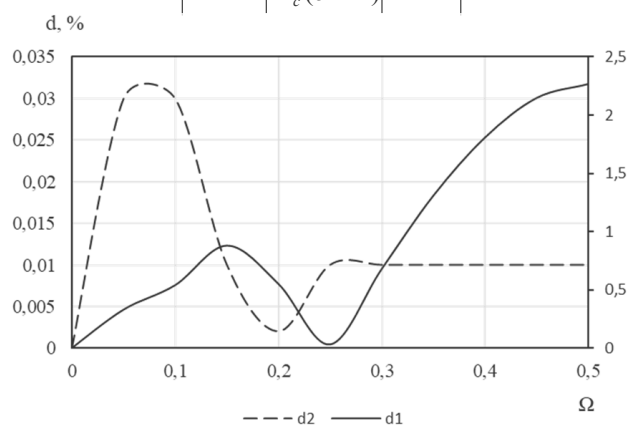


Рис. 2. Зависимости модуля относительной погрешности АЧХ от нормированной частоты

$$d2(\Omega) = \left| \frac{H_c(e^{j2\pi\Omega}) - H(e^{j2\pi\Omega})}{H_c(e^{j2\pi\Omega})} \right| \times 100\%. \quad (24)$$

Зависимости модулей относительных погрешностей  $d_1$  и  $d_2$  от нормированной частоты  $\Omega$  приведены на рисунке 2.

Для сравнения временных характеристик функций (6) и (22) с (1), определим для каждой из них импульсную характеристику, ограничившись первыми 11 отсчетами:

$$\begin{aligned} h_c(n) &= \{0; 0,175; 0,2037; 0,2177; 0,1732; 0,121; \\ &0,0741; 0,038; 0,0135; -0,0009; -0,0078\}; \\ h_{\phi 2}(n) &= \{-0,0001; 0,174; 0,2339; 0,2166; 0,1727; \\ &0,1208; 0,0741; 0,0381; 0,0137; -0,0008; -0,0077\}; \\ h(n) &= \{0; 0,175; 0,2306; 0,2177; 0,1733; 0,123; \\ &0,0741; 0,038; 0,0135; -0,0009; -0,0078\}. \end{aligned}$$

Определим модуль относительной погрешности для отсчетов импульсных характеристик функций (6) и (22), значения которых составляют не менее 1% от максимального значения импульсной характеристики:

$$dh1(n) = \left| \frac{h_c(n) - h_{\phi 2}(n)}{h_c(n)} \right| \times 100\%; \quad (25)$$

$$dh2(n) = \left| \frac{h_c(n) - h(n)}{h_c(n)} \right| \times 100\%. \quad (26)$$

Зависимости модулей относительной погрешности  $dh1$  и  $dh2$  от номера отсчета  $n$  приведены на рисунке 3.

Анализ представленных на рисунках 2 и 3 результатов показывает, что:

- в случае идентификации системы методом наименьших квадратов (6) коэффициенты реальной цепи и модели незначительно различаются, относительная погрешность АЧХ ( $d1$ ) не превышает 2,5%, отсчеты импульсной характеристики ( $dh1$ ) отличаются не более чем на 1,5%.

- при идентификации по входному и выходному сигналам передаточная функция модели (22) и передаточная функция реальной цепи практически совпадают, относительные погрешности АЧХ ( $d2$ ) и отсчетов импульсной характеристики ( $dh2$ ) не превышают 0,05%.

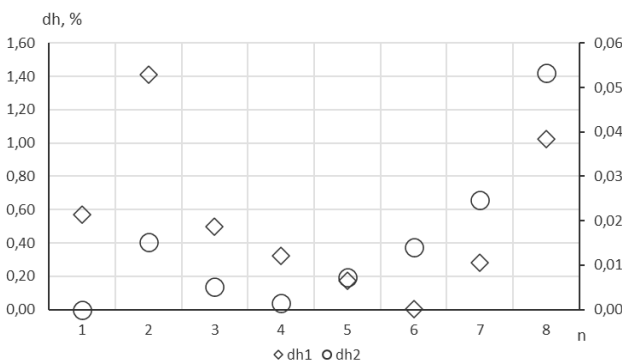


Рис. 3. Зависимости модулей относительной погрешности отсчетов импульсной характеристики от номера отсчета

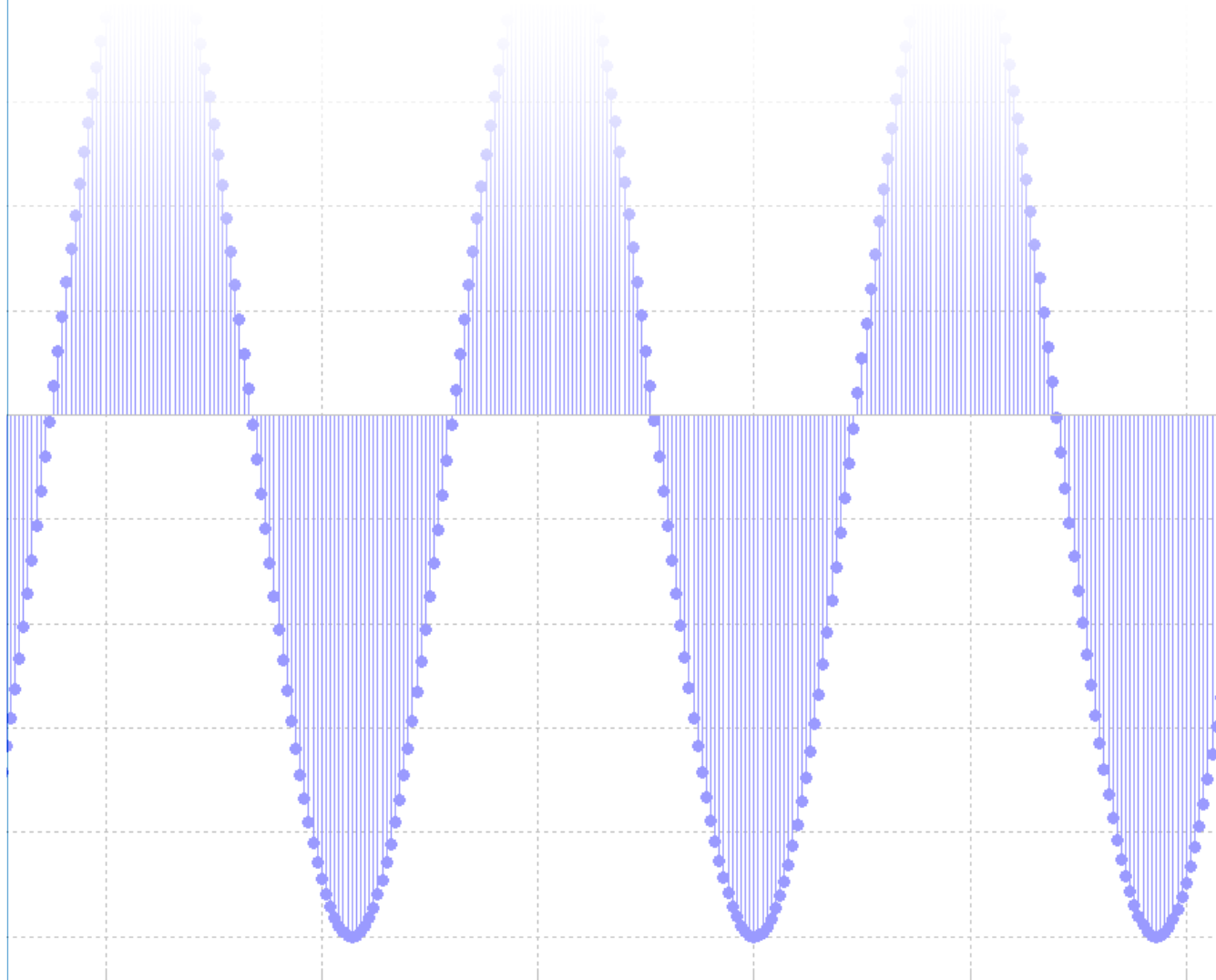
### Заключение

При идентификации неизвестной цепи методом наименьших квадратов не существует возможности изначально определить порядок передаточной функции неизвестной рекурсивной цепи, поэтому приходится завышать порядок модели, что приводит к увеличению объема вычислений и увеличению времени идентификации.

Метод идентификации передаточной функции неизвестной цепи по ее входному и выходному сигналам значительно выигрывает как в точности, так и в скорости вычислений. С помощью известного входного сигнала и ограниченного числа отсчетов выходного сигнала он позволяет определить порядок неизвестной рекурсивной цепи и с высокой точностью определить ее коэффициенты. Поэтому при адаптивном выравнивании частотных характеристик канала связи целесообразно первоначально выполнить его идентификацию по входному и выходному сигналам.

### Литература

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
2. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
3. Лубский В.В., Тихобаев В.Г., Ремизов С.А., Рясный Ю.В. Метод определения передаточной функции дискретной цепи // Известия Института инженерной физики, 2012. №3(25). С.81-85.
4. Рясный Ю.В., Ремизов С.А. Моделирование передаточной функции телекоммуникационных устройств рекурсивной дискретной цепью на основе рабочей функции // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.34-36.
5. Дежина Е. В., Рясный Ю. В., Черных Ю. С. Анализ процесса адаптации при идентификации системы КИХ- и БИХ- фильтрами методом наименьших квадратов // Актуальные проблемы электронного приборостроения: труды XII международной конференции, АПЭП-2014. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. Т.3. С.86-88.



## ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СЖАТИЯ ДВОИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

## INCREASING THE THROUGHPUT OF A PROMISING INTEGRATED SPECIAL-PURPOSE CONTROL SYSTEM BASED ON THE METHOD OF FUNCTIONAL BINARY INFORMATION COMPRESSION

**Сергей Евгеньевич Орехов**  
кандидат технических наук, доцент  
начальник кафедры  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная д. 17  
Тел.: 8 (916) 853-76-18  
E-mail: majorose@mail.ru

**Владимир Михайлович Орловский**  
адъюнкт  
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, ул. Бригадная д. 17  
Тел.: 8 (991) 209-03-24  
E-mail: orlovskiy\_vladimir@mail.ru

### Аннотация

В статье рассматривается метод функционального сжатия двоичной информации, позволяющий повысить пропускную способность перспективной интегрированной системы управления специального назначения за счет эффективного сжатия статистически выровненных данных, то есть тех, которые подвергались криптографическому или статистическому кодированию.

**Ключевые слова:** функциональное сжатие, пропускная способность, алгоритм, система управления, информационный поток.

### Summary

The article discusses the method of functional compression of binary information, which allows to increase the throughput of a promising integrated special-purpose control system by effectively compressing statistically aligned data, that is, those that have been subjected to cryptographic or statistical coding.

**Keywords:** functional compression, capacity, algorithm, control system, information flow.

Под интегрированной системой управления [1] понимается такая система управления, в которую встроены программные интерфейсы взаимодействия с обеспечивающей ее автоматизированной системой связи. Отличительной особенностью интегрированных систем управления является совместное использование общей универсальной аппаратно-программной платформы, которая динамически реконфигурируется под требования той или иной системы. Реконфигурация платформы должна обеспечивать высокие показатели функциональной устойчивости и эффективности решения клиентских запросов [1,2].

Вместе с тем, особенностью перспективной интегрированной системы управления специального назначения является преимуществен-

ное использование радиоканалов метрового и дециметрового диапазонов в условиях сложной помеховой обстановки при достижении высокого уровня разведзащищенности. Таким образом, повышение пропускной способности рассматриваемой системы управления становится возможным, как правило, за счет совершенствования алгоритмов сжатия информации, помехозащиты, маршрутизации и управления потоками, а также их программно-аппаратного обеспечения [2-4].

Сущность метода заключается в следующем.

Исходный блок двоичной информации  $I$  (BUBD – block of uncompressed binary data) сегментируется на множество субблоков  $\{I_s\}$  определенных размеров:

$$size(I_s) = n \times n \times k, \quad (1)$$

где  $n \times n$  – размер кодовой таблицы (CTS – coding table size);

$k$  – разрядность символа CTS  $a_{ij}^*$ .

Символ CTS дополняется последовательностью служебных разрядов *nonce1*, в которой старший разряд *sign1* определяет знак расширенного символа  $a_{ij}$ . Формат расширенного символа представлен выражением (2).

$$a_{ij} = \left[ \begin{array}{c} \text{sign1} \\ \text{nonce1} \end{array} \right] a_{ij}^* \quad (2)$$

Расширенные символы, в свою очередь, яв-

ляются элементами матрицы коэффициентов **A** СЛАУ размером  $n \times n$ . Формат элементов вектора свободных членов (**B**), вынесенных в правую часть уравнений, соответствует выражению (3) и представляет собой только последовательность служебных разрядов *nonce2*, в которой старший разряд *sign2* определяет знак свободного члена  $b_i$

$$b_i = \left[ \begin{array}{c} \text{sign2} \\ \text{nonce2} \end{array} \right] \quad (3)$$

Для полноценной работы алгоритма сжатия необходимо вычислить значение хеш-функции *h* матрицы коэффициентов **A** СЛАУ любым из известных способов

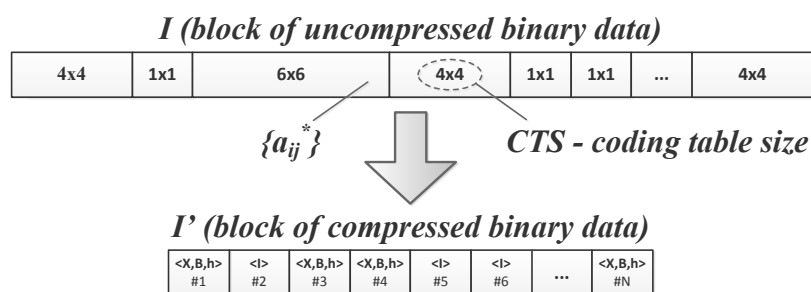


Рис. 1. Упрощенная схема процесса функционального сжатия блока двоичных данных

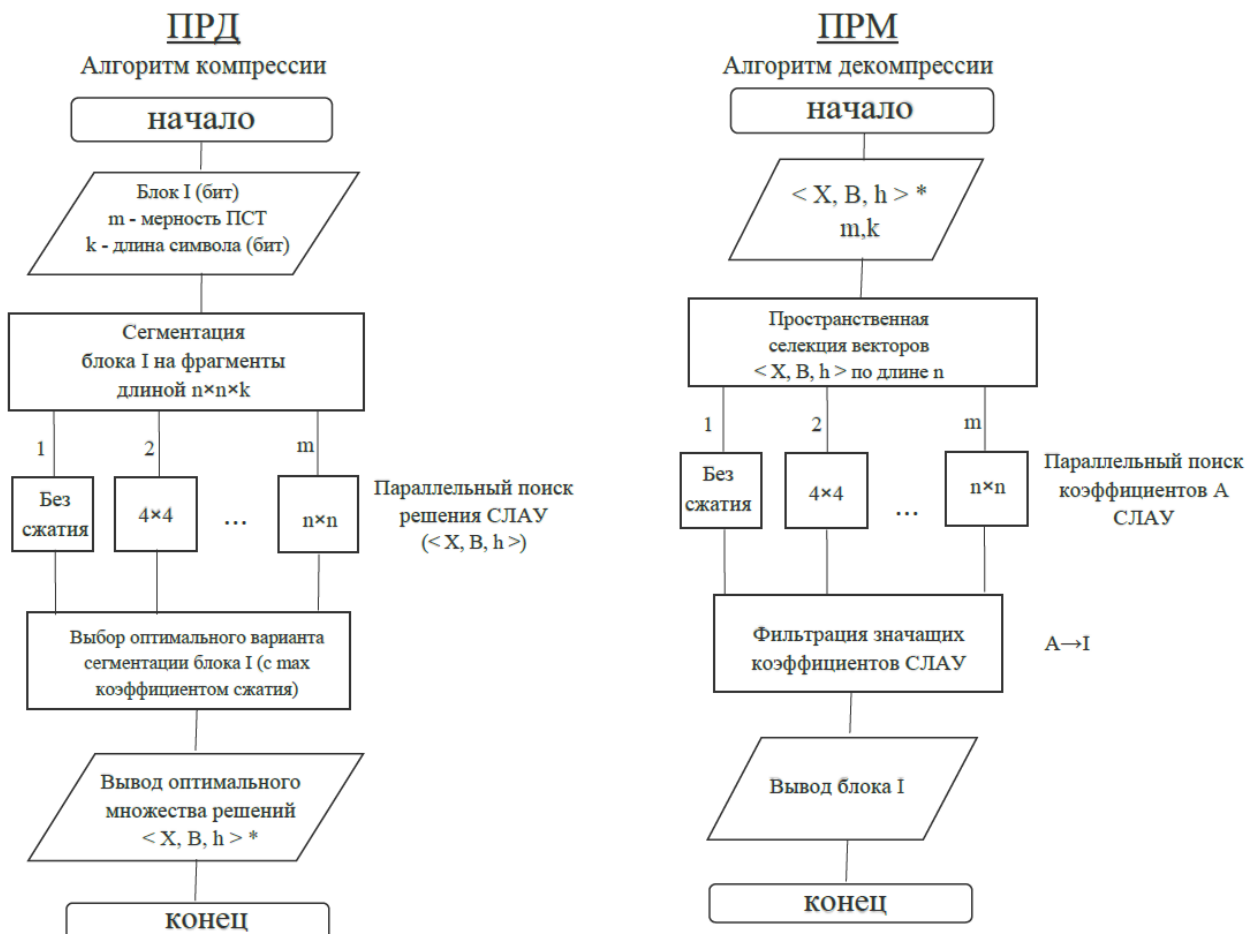


Рис. 2. Алгоритм функционального сжатия двоичной информации (на передающей стороне (ПРД) – алгоритм компрессии, на приемной стороне (ПРМ) – алгоритм декомпрессии)





скрытности интегрированной системы управления специального назначения, что достигается возможностью перехода на помехозащищенные и скрытные режимы работы средств радиосвязи, как правило, характеризующиеся низкой скоростью информационного обмена.

Алгоритм реализован в программной среде Python [5]. На *рисунке 3* представлен CLI интерфейс программы, демонстрирующей возможности метода функционального сжатия двоичной информации. Результаты моделирования, полученные при помощи данной программы, а именно анализ значений коэффициента сжатия, позволяют сделать обоснованный вывод о том, что исследуемый метод способен достаточно эффективно сжимать входной массив двоичных данных.

Таким образом, метод функционального сжатия двоичной информации позволит существенно повысить пропускную способность перспективных интегрированных систем управления и сетей связи (в среднем, до 15-20%) при наличии соответствующих вычислительных мощностей.

### Литература

1. Орехов С.Е., Артамонов Д.П., Иванов С.А. Технологии облачных вычислений в интегрированных системах управления // Инфокоммуникационные технологии, 2020. Т. 18. № 4. С. 477-484.
2. Орехов С.Е., Ваганов И.Н. Концептуальная модель пакетной сети радиосвязи метрового диапазона с многомерными маршрутами передачи сообщений // Известия Института инженерной физики, 2009. №1 (11). С. 57-61.
3. Орехов С.Е., Сысоев И.В. Оптимизация распределения ТСП нагрузки по параллельному сетевому тракту сети связи с многомерной маршрутизацией пакетов // Известия Института инженерной физики, 2014. №1 (31). С. 57-59.
4. Орехов С.Е. Численный метод анализа временных характеристик случайного процесса, описываемого поглощающей конечной марковской цепью с неоднородными по длительности шагами переходов между состояниями цепи // Известия Института инженерной физики, 2013. №3 (29). С. 62-65.
5. Златопольский Д.М. Основы программирования на языке Python. М.: ДМК Пресс, 2017. 284 с.



## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК. 629.783

### ДВУХКОНТУРНАЯ СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ НАВЕДЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА НА КОСМИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ

### DUAL-LOOP TRACKING SYSTEM OF A SPECIALIZED SPACECRAFT FOR POINTING AN OPTOELECTRONIC DEVICE AT SPACE OBJECT

#### 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  
АНО «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл.,  
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: dv\_smr@iifmail.ru

#### Владимир Иванович Крыжановский

кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры бортовых информационных и  
измерительных комплексов  
ВКА им. А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13

#### Илья Анатольевич Трофимов

кандидат технических наук  
доцент кафедры бортовых информационных и  
измерительных комплексов  
ВКА им. А.Ф. Можайского  
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,  
ул. Ждановская, д. 13  
Тел.: +7 (911) 163-12-99

#### Аннотация

Рассматривается задача управления двухконтурной следящей системой для разворота поворотной платформы, на которой расположен оптико-электронный прибор (ОЭП). Наведение оптической оси ОЭП на объект наблюдения производится путем одновременного разворота платформы по азимуту и разворота ОЭП относительно платформы по высоте. Исследованы особенности управления и разработаны алгоритмы наведения ОЭП на подвижный объект наблюдения.

**Ключевые слова:** двухконтурная следящая система, оптимальное по быстродействию управление, наведение на подвижную цель.

#### Summary

The problem of controlling a two-loop servo system for turning a turntable, on which an optical-electronic device (OED) is located, is considered. Pointing the optical axis of the OED to the object of observation is carried out by simultaneously turning the platform in azimuth and turning the OED relative to the platform in height. The features of control are studied and algorithms for pointing the OED to a moving object of observation are developed.

Keywords: double-loop servo system, speed-optimal control, guidance to a moving target.

#### Введение

Наведение на цель ОЭП и ее удержание по оси визирования требуется при решении важных прикладных задач, в том числе для мониторинга космического пространства и земной поверхности, сближения космического аппарата (КА) с другим космическим объектом, проведения научных исследований. Поскольку массогабаритные характеристики ОЭП и КА в ряде случаев соизмеримы, ОЭП жестко связан с КА

и наведение на цель производится путем разворота корпуса КА. Такой подход приводит к увеличенному расходу рабочего тела или энергии, а также не позволяет производить независимые угловые маневры ОЭП и КА. Независимость углового движения особенно важна при сближении, в процессе которого требуется постоянно удерживать цель в поле зрения и одновременно совершать угловое движение КА для требуемой пространственной ориентации корректирующей

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

щей двигательной установки.

Для устранения этих недостатков в работах [1,2] было предложено для наведения на цель ОЭП использовать двухконтурную электромеханическую дистанционную следящую систему (ЭМДСС), где ОЭП размещается на платформе, которая может совершать управляемое угловое движение (первый контур) относительно корпуса КА для разворота по азимуту. Разворот ОЭП относительно платформы по высоте производится с помощью второго контура управления. В работе [3] был предложен оптимальный по быстродействию алгоритм управления для случая неподвижной цели, известных конечных углов разворота по азимуту и высоте и нулевых угловых скоростях в конце разворота. Если цель подвижна и необходимо ее сопровождение после разворота, требуемые значения углов и угловых скоростей в конечной точке разворота неизвестны, поскольку невозможно заранее рассчитать длительность разворота, следовательно и конечную точку, в которой окажется цель. Разработка алгоритма оптимального по быстродействию управления при неизвестных конечных угловых параметрах разворота по азимуту и высоте является актуальной и практически важной задачей.

### Постановка задачи

Необходимо сформировать алгоритм оптимального по быстродействию управления угловым движением на интервале времени в двухконтурной следящей системе по углу поворота платформы относительно корпуса КА  $\psi$  и углу поворота линии визирования ОЭП относительно платформы  $\theta$ . Разворот платформы и ОЭП производится электрическими двигателями через понижающие редукторы. Как объект управления соединение двигателя, редуктора и присоединенной нагрузки представляет собой инерционное интегрирующее звено, входным сигналом которого является управляющее напряжение, а выходным – угол поворота вала редуктора. Известны угловые параметры

$$\psi_0 = \psi(0), \dot{\psi}_0 = \dot{\psi}(0), \theta_0 = \theta(0), \dot{\theta}_0 = \dot{\theta}(0)$$

платформы и линии визирования ОЭП в нулевой момент времени. В общем случае известны законы изменения угловых параметров линии направления на цель

$$\psi_u(t), \dot{\psi}_u(t), \theta_u(t), \dot{\theta}_u(t)$$

и их значения в нулевой момент времени

$$\psi_{u0}(t), \dot{\psi}_{u0}(t), \theta_{u0}(t), \dot{\theta}_{u0}(t).$$

Влияние углового движения корпуса КА на движение ЭМДСС не учитывается.

Необходимо осуществить разворот платформы и линии визирования ОЭП за минимальное

время таким образом, чтобы в момент времени  $t_k$

обеспечить выполнение граничных условий:

$$\psi(t_k) = \psi_u(t_k), \dot{\psi}(t_k) = \dot{\psi}_u(t_k), \theta(t_k) = \theta_u(t_k), \dot{\theta}(t_k) = \dot{\theta}_u(t_k),$$

а также минимизировать время  $t_k$ .

### Поиск оптимального управления при автономных разворотах

Переходные процессы при развороте платформы и линии визирования ОЭП полностью определяются динамикой разворота электрического двигателя. Передаточная функция, описывающая зависимость угла поворота электрического двигателя от приложенного входного напряжения имеет вид:

$$W(p) = \frac{k}{p(Tp+1)}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент передачи двигателя с учетом коэффициента передачи редуктора;

$T$  – эквивалентная постоянная времени двигателя с учетом моментов инерции редуктора и присоединенной нагрузки.

Известно [4], что оптимальный по быстродействию угловой разворот такого объекта производится в течение двух интервалов. На первом интервале в течение времени  $t_{01}$  производится разгон двигателя в требуемом направлении, на втором интервале в течение времени  $t_{12}$  выполняется торможение. На вход двигателя подается номинальное напряжение  $U=U_0$  соответствующего знака. Динамика движения двигателя при подаче на его вход постоянного напряжения описывается соотношениями:

$$y(t) = y(0) + T\dot{y}(0)\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + kU\left[t - T\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)\right], \quad (2)$$

$$\dot{y}(t) = \dot{y}(0)e^{-\frac{t}{T}} + kU\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

где  $y(t)$  – угол поворота выходного вала редуктора.

В работе [3] показано, что путем использования выражений (2) может быть получено решение для управления по разомкнутой схеме. Однако в этом случае множество причин, в том числе взаимовлияние между каналами при совместных разворотах платформы и ОЭП приводят к появлению ошибок в конечной точке разворота. В данной работе поиск оптимального управления по замкнутой схеме будем выполнять с помощью метода фазовых траекторий. Если в процессе разворота выполняется условие

$$|\dot{y}| \leq kU_0 \quad (3)$$

уравнения фазовых траекторий имеют вид

$$\begin{aligned} y &= -T\dot{y} - kU_0T \ln(kU_0 - \dot{y}) + C_1 \text{ при } U=U_0, \\ y &= -T\dot{y} + kU_0T \ln(kU_0 + \dot{y}) + C_2 \text{ при } U=-U_0, \\ y &= -T\dot{y} + C_3 \text{ при } U=0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  – произвольные постоянные, завися-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

щие от начальных условий.

Фазовая траектория оптимального по быстродействию разворота для условий

$$y_0 < y_{\text{цк}} \text{ и } \dot{y}_{\text{цк}} > 0 \quad (5)$$

приведена на *рисунке 1*.

На *рисунке 1* заштрихованной кривой показана линия переключения. Верхняя часть линии переключения формируется при  $U = -U_0$  и проходит через точку  $(y_{\text{цк}}, \dot{y}_{\text{цк}})$ . С помощью второго уравнения соотношений (4) определяем произвольную постоянную  $C_2$

$$C_2 = y_{\text{цк}} + T\dot{y}_{\text{цк}} - kU_0T \ln(kU_0 + \dot{y}_{\text{цк}}) \quad (6)$$

С учетом соотношений (4,6) уравнение верхней части линии переключения имеет вид:

$$y - y_{\text{цк}} + T(\dot{y} - \dot{y}_{\text{цк}}) + kU_0T [\ln(kU_0 + \dot{y}_{\text{цк}}) - \ln(kU_0 + \dot{y})] = 0 \quad (7)$$

Аналогично определяем уравнение нижней части линии переключения при управляющем воздействии  $U = U_0$

$$y - y_{\text{цк}} + T(\dot{y} - \dot{y}_{\text{цк}}) + kU_0T [\ln(kU_0 - \dot{y}) - \ln(kU_0 - \dot{y}_{\text{цк}})] = 0 \quad (8)$$

Вводим обозначение

$$s = \text{sgn}(\dot{y} - \dot{y}_{\text{цк}}) \quad (9)$$

Анализ выражений (7), (8) показывает, что уравнение линии переключения в целом с учетом (9) может быть записано в виде

$$y - y_{\text{цк}} + T(\dot{y} - \dot{y}_{\text{цк}}) + kU_0T [\ln(kU_0 + \dot{y}_{\text{цк}}s) - \ln(kU_0 + \dot{y}s)] = 0 \quad (10)$$

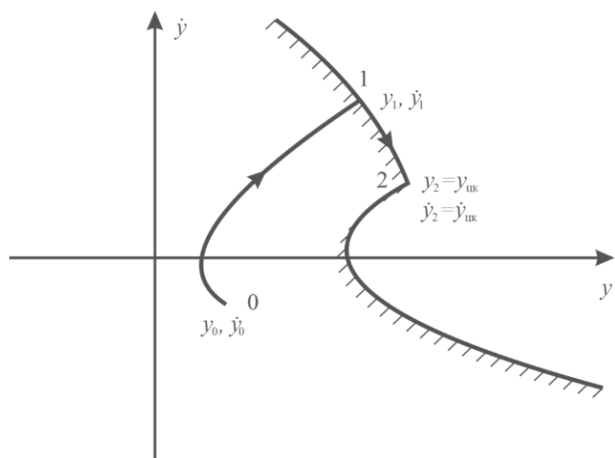
Вводим функцию переключения

$$u = -\left\{ y - y_{\text{цк}} + T(\dot{y} - \dot{y}_{\text{цк}}) + kU_0T [\ln(kU_0 + \dot{y}_{\text{цк}}s) - \ln(kU_0 + \dot{y}s)] = 0 \right\} \quad (11)$$

Функция переключения положительна, если изображающая точка на фазовой плоскости располагается левее линии переключения и отрицательна, если изображающая точка на фазовой плоскости располагается правее линии переключения, поэтому алгоритм управления имеет вид

$$U = U_0 \text{sgn} u. \quad (12)$$

Для формирования функции переключения необходимо знать координаты конечной точки. В рассматриваемом случае цель движется, время разворота платформы и ОЭП посчитать заранее



**Рис. 1.** Фазовая траектория оптимального по быстродействию разворота

невозможно, поэтому неизвестно, в какой точке окажется цель в момент окончания разворота. Для разрешения этого противоречия предлагается использовать изложенный в работе [5] итерационный алгоритм. Работа алгоритма предусматривает вычисление угловой скорости  $\dot{y}_1$  в момент переключения (*рисунк 1*), для ее вычисления используем уравнения фазовых траекторий (4). На участке разгона  $U = U_0$ , фазовая траектория проходит через точку  $(y_0, \dot{y}_0)$ , поэтому справедливо

$$C_1 = y_0 + T\dot{y}_0 + kU_0T \ln(kU_0 - \dot{y}_0). \quad (13)$$

На участке торможения  $U = -U_0$ , фазовая траектория проходит через точку  $(y_{\text{цк}}, \dot{y}_{\text{цк}})$ , поэтому справедливо

$$C_2 = y_{\text{цк}} + T\dot{y}_{\text{цк}} - kU_0T \ln(kU_0 + \dot{y}_{\text{цк}}). \quad (14)$$

Поскольку фазовые траектории разгона и торможения пересекаются, приравниваем значения углов в точке пересечения и после проведения математических преобразований получаем:

$$\ln(kU_0 - \dot{y}_1) + \ln(kU_0 + \dot{y}_1) = \frac{C_1 - C_2}{kU_0T}. \quad (15)$$

Воспользуемся формулой о сумме логарифмов и находим

$$\ln[(kU_0 - \dot{y}_1)(kU_0 + \dot{y}_1)] = \frac{C_1 - C_2}{kU_0T}. \quad (16)$$

Выполняем необходимые математические преобразования и находим соотношение для определения угловой скорости в момент переключения

$$\dot{y}_1^2 = k^2U_0^2 - e^{\frac{C_1 - C_2}{kU_0T}}. \quad (17)$$

По известному значению угловой скорости в момент переключения можно определить время разгона  $t_{01}$  и торможения  $t_{12}$ . Для определения  $t_{01}$  воспользуемся выражением для угловой скорости из системы уравнений (2)

$$\dot{y}_1 = \dot{y}_0 e^{-\frac{t_{01}}{T}} + kU_0 \left( 1 - e^{-\frac{t_{01}}{T}} \right). \quad (18)$$

После выполнения математических преобразований находим соотношение

$$e^{-\frac{t_{01}}{T}} = \frac{\dot{y}_1 - kU_0}{\dot{y}_0 - kU_0}$$

и выражение для определения  $t_{01}$

$$t_{01} = -T \ln \frac{\dot{y}_1 - kU_0}{\dot{y}_0 - kU_0}. \quad (19)$$

По аналогии находим выражение для определения  $t_{12}$

$$t_{12} = -T \ln \frac{\dot{y}_{\text{цк}} + kU_0}{\dot{y}_1 + kU_0}. \quad (20)$$

Для нахождения функции переключения (11) необходимо найти значения  $y_{\text{цк}}, \dot{y}_{\text{цк}}$ . Упрощенный итерационный алгоритм, с помощью которого возможно решение этой задачи, приведен ниже.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

1. Задаемся достаточно большой переменной  $a$ , например равной 1 000 000.

2. Задаемся предполагаемым значением времени  $t_k$ .

3. По выражениям для  $y_u(t)$  и  $\dot{y}_u(t)$  определяем предполагаемое направление на цель по углу  $y_{цк} = y_u(t_k)$  и угловой скорости  $\dot{y}_{цк} = \dot{y}_u(t_k)$  в момент окончания разворота.

4. По формуле (17) определяем угловую скорость  $\dot{y}_1$  в момент переключения.

5. По формулам (19,20) определяем время разгона  $t_{01}$  и время торможения  $t_{12}$ .

6. По формулам (2) определяем фактическое значение угла поворота  $y_2$  и угловой скорости  $\dot{y}_2$  в момент окончания разворота.

7. Определяем фактическое значение времени выключения  $t_{k1}$ .

8. По выражениям для  $y_u(t)$  и  $\dot{y}_u(t)$  определяем фактическое направление на цель по углу  $y_{цк1} = y_u(t_{k1})$  и угловой скорости  $\dot{y}_{цк1} = \dot{y}_u(t_{k1})$  в момент окончания разворота.

9. Определяем степень отклонения направления разворота от направления на цель в момент времени  $t_{k1}$

$$c = k_1 (y_2 - y_{цк1})^2 + k_2 (\dot{y}_2 - \dot{y}_{цк1})^2$$

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  вводятся для обеспечения приоритетности степени отклонения по углу и угловой скорости, а также для соблюдения размерности.

10. Проверяем выполнение условия  $c < b$ , где  $b$  – малая величина, определяемая требованиями по точности. Если условие выполняется, решение найдено и происходит выход из расчета, в противном случае вычисляется новое значение  $t_k$ , оно находится по формуле

$$t_k = t_k + k_{cx} (t_{k1} - t_k)$$

где  $k_{cx}$  – коэффициент сходимости, выбирается в

диапазоне 0,01-0,5 в зависимости от требований по точности, далее переменной  $a$  присваивается значение  $c$  и происходит возврат в п. 3.

После завершения работы итерационного алгоритма определяется конечная точка. Полученные значения  $y_{цк}, \dot{y}_{цк}$  необходимо использовать для формирования функции переключения (11) и дальнейшего управления разворотом по замкнутой схеме.

### Пример автономных разворотов платформы и ОЭП

Начальный угол разворота и начальная угловая скорость платформы равны нулю. Коэффициент передачи  $k$  двигателя с редуктором равен 3 град/(В·с), постоянная времени  $T$  с учетом приведенной нагрузки равна 0,27 с. Номинальное напряжение на входе двигателя  $U_0 = 60$  В. Движение цели описывается уравнением

$$y_c(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2$$

где  $A_0 = 100$ ,  $A_1 = 20^\circ/\text{с}$ ,  $A_2 = 2^\circ/\text{с}^2$ .

Для определения  $y_{цк}, \dot{y}_{цк}$  применяем итерационный способ поиска решения, при этом выби-

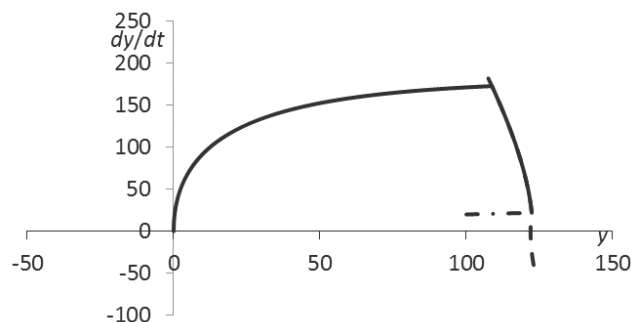


Рис. 2. Фазовые траектории углового движения платформы и цели

Таблица 1  
Поиск конечной точки для разворота платформы

Итерация	$t_k$	$t_{k1}$	$t_{01}$	$t_{12}$	$y_2$	$\dot{y}_2$	$y_{цк}$	$\dot{y}_{цк}$
1	0,000	0,9003	0,7505	0,1498	100,000	20,000	119,629	21,801
2	0,6753	0,9837	0,8332	0,1504	114,418	21,351	121,610	21,967
3	0,9066	1,0143	0,8637	0,1505	119,776	21,813	122,345	22,029
4	0,9874	1,0253	0,8747	0,1506	121,698	21,975	122,609	22,051
5	1,0158	1,0292	0,8786	0,1506	122,381	22,032	122,703	22,058
6	1,0258	1,0305	0,8799	0,1506	122,622	22,052	122,736	22,061
7	1,0294	1,0310	0,8804	0,1506	122,708	22,059	122,748	22,062
8	1,0306	1,0312	0,8806	0,1506	122,738	22,061	122,752	22,062
9	1,0311	1,0313	0,8807	0,1506	122,748	22,062	122,753	22,063

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

раем  $t_k=0$  в качестве начального приближения и  $k_{cx}=0,5$ . Поиск решения представлен в *таблице 1*.

Как видно из последней строки таблицы, в конечной точке угловые параметры поворота платформы и линии направления на цель по азимуту практически совпадают, параметр итерационного алгоритма  $c=0,0000252$ . Длительность переходного процесса  $t_{на}$  равна 1,0311 с. Найденное решение  $y_{цк}=122,753^\circ$  и  $\dot{y}_{цк}=22,063^\circ/c$  подставляем в выражение (11) и находим функцию переключения

$$s = \text{sgn}(\dot{y} - 22,063),$$

$$u = -\left\{y - 122,753 + 0,27(\dot{y} - 22,063) + 48,6 \left[ \ln(180 + 22,063s) - \ln(180 + ys) \right] \right\} s = 0$$

Фазовые траектории для углового движения платформы и линии направления на цель приведены на *рисунке 2*.

На *рисунке 2* сплошной линией показано угловое движение платформы, штрихпунктирной – линии направления на цель, штриховой – линии переключения.

В работе подробно рассмотрен случай, когда на первом интервале к двигателю прикладывается напряжение  $U_0$ , а на втором интервале  $-U_0$ . Если начальные условия такие, что на первом интервале к двигателю необходимо прикладывать напряжение  $-U_0$ , алгоритм не меняется, однако при вычислении угловой скорости в момент переключения по формуле (17) произвольные постоянные следует вычислять по формулам

$$C_1 = y_k + T\dot{y}_k + kU_0T \ln(kU_0 - \dot{y}_k),$$

$$C_2 = y_0 + T\dot{y}_0 - kU_0T \ln(kU_0 + \dot{y}_0),$$

а время разгона и торможения по формулам

$$t_{01} = -T \ln \frac{\dot{y}_1 + kU_0}{\dot{y}_0 + kU_0}, t_{01} = -T \ln \frac{\dot{y}_k - kU_0}{\dot{y}_1 - kU_0}.$$

Следящая система для разворота ОЭП ничем не отличается от следящей системы для разворота платформы, поэтому все полученные результаты могут быть использованы для формирования оптимальных по быстродействию разворотов ОЭП. Моделирование процесса разворота ОЭП по высоте при начальных условиях  $y(0)=5^\circ, \dot{y}(0)=-2^\circ/c$  и движении цели в соответствии с уравнением

$y_{ц}(t) = B_0 + B_1t + B_2t^2, B_0 = 60^\circ, B_1 = 10^\circ/c, B_2 = 5^\circ/c^2$ . (21) показало, что длительность переходного процесса  $t_{озп}$  равна 0,4904 с,  $y_{цп}=66,106^\circ$  и  $\dot{y}_{цк}=12,452^\circ/c$ , в конечной точке угловые параметры поворота ОЭП и линии направления на цель по высоте практически совпадают. Полученные при моделировании результаты подтверждают правильность полученных расчетных соотношений и

эффективность итерационного алгоритма.

### Управление при одновременных разворотах платформы и ОЭП

При одновременных разворотах необходимо, чтобы наведение ОЭП на цель по азимуту и высоте заканчивалось одновременно в момент времени  $t_k$ , при этом оптическая ось ОЭП должна совпадать с линией направления на цель. В качестве времени  $t_k$  следует выбирать большее из времен, полученных при расчете автономных разворотов платформы и ОЭП. Не умаляя общности рассмотрим случай из примера, когда длительность разворота платформы больше длительности разворота ОЭП. Необходимо сформировать управление, которое обеспечит разворот ОЭП за заданное время  $t_k$ , при этом следует учитывать, что конечное значение направления линии визирования на цель по высоте тоже изменится. Возможно несколько вариантов такого разворота.

Первый вариант предполагает управление с формированием функции переключения по выражению (11) и уменьшению управляющего напряжения  $U_0$  на входе двигателя. Для определения требуемого напряжения целесообразно применить итерационный алгоритм:

1. По уравнениям движения цели определяем  $y_{ц}(t_k)$  и  $\dot{y}_{ц}(t_k)$ .

2. Методом половинного деления или золотого сечения выбираем значение управляющего напряжения, начинать можно с номинального значения.

3. Определяем фактическое значение угла поворота  $y_2$  и угловой скорости  $\dot{y}_2$  в момент окончания разворота.

4. Определяем степень отклонения направления разворота от направления на цель в момент времени  $t_k$ .

5. Если степень отклонения удовлетворяет заданной точности, расчет завершается, в противном случае производится возврат в п. 2.

Проведенный расчет с параметрами примера показал, что требуется выбрать  $U_0=26,54$  В, при этом  $t_{озп}=1,0311$  с, а линия визирования по высоте совпадает с линией направления на цель с заданной точностью. Для получения решения потребовалось 8 итераций.

Второй вариант предполагает задержку разворота ОЭП при нулевом напряжении на входе двигателя на некоторое время, а затем оптимальный разворот при номинальном напряжении таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия

$$t_k = t_3 + t_{01} + t_{12},$$

где  $t_3$  – время задержки.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Следует учитывать, что при ненулевых начальных условиях для ОЭП его угловые параметры за время задержки меняются. Для определения требуемого времени задержки применяем алгоритм:

1. С помощью упрощенного алгоритма, изложенного выше, определяем  $t_{01}$  и  $t_{12}$  при нулевой задержке.

2. Определяем время задержки

$$t_3 = t_k - t_{01} - t_{12},$$

3. Определяем угловые параметры ОЭП в момент окончания задержки, принимаем их за начальные условия и находим новые значения  $t_{01}$  и  $t_{12}$ .

4. Проверяем выполнение условия

$$t_k = t_3 + t_{01} + t_{12}$$

и определяем отклонение по углу и угловой скорости направления линии визирования ОЭП от направления на цель.

5. Если степень отклонения удовлетворяет заданным требованиям по точности, расчет завершается, в противном случае производится возврат в п. 2.

В таблице 2 представлен поиск решения.

Переходные процессы показаны на рисунке 3.

На рисунке 3. сплошными линиями показано

движение платформы и цели по азимуту, пунктирными – движение ОЭП и цели по высоте.

На рисунке 4 показаны возможные фазовые траектории движения ОЭП при третьем варианте управления.

При движении по траектории 3 на первом этапе производится разгон в нужном направлении, затем движение по инерции до достижения конечной точки. Очевидно, что время движения по фазовым траекториям, проходящим выше третьей, будет меньше, а время движения по проходящим ниже – больше. Для определения времени движения на этапах траектории 3 используем уравнения фазовых траекторий (4) для случаев  $U=U_0$ , выражение (13) для определения  $C_1$  и получаем

$$\dot{y}_{13} = kU_0 - e^{\frac{-C_1 - y_{цк} - T\dot{y}_{цк}}{kU_0 T}},$$

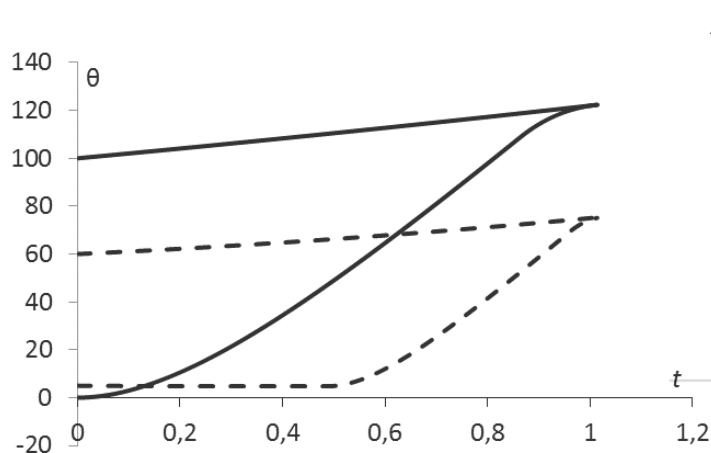
$$t_{01} = -T \ln \frac{\dot{y}_{13} - kU_0}{\dot{y}_0 - kU_0}, t_{12} = -T \ln \frac{\dot{y}_{цк}}{\dot{y}_{12}}. \quad (22)$$

Разворот по траектории 4 невозможен, поскольку время движения по инерции будет равно бесконечности, однако для дальнейших расчетов необходимо определить скорость  $\dot{y}_{14}$ , для этого с учетом выражений (2,4,8,13) находим

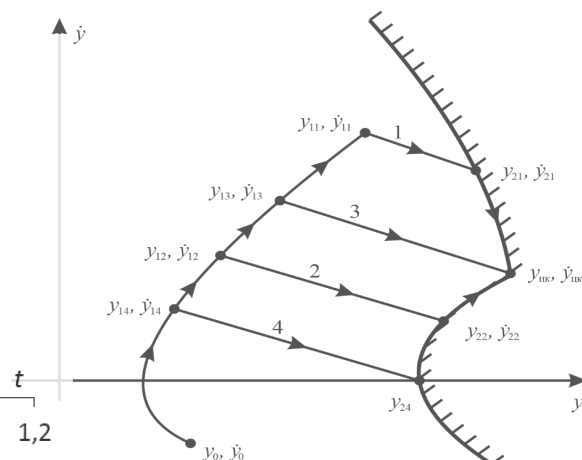
$$y_{24} = y_{цк} + T\dot{y}_{цк} - kU_0 T \ln kU_0 + kU_0 T \ln(kU_0 - \dot{y}_{цк}),$$

**Таблица 2**  
Поиск времени задержки

Итерация	$t_k$	$t_{k1}$	$t_{01}$	$t_{12}$	$y_2$	$\dot{y}_2$	$y_{цк}$	$\dot{y}_{цк}$
1	0,000	0,4903	0,4195	0,0708	66,100	12,450	66,106	12,452
2	0,5408	1,0904	0,4800	0,0696	76,847	15,451	76,851	15,453
3	0,4815	1,0236	0,4723	0,0698	75,471	15,117	75,475	15,118
4	0,4890	1,0320	0,4732	0,0698	75,642	15,159	75,647	15,160
5	0,4881	1,0310	0,4731	0,0698	75,622	15,154	75,626	15,155



**Рис. 3.** Переходные процессы при одновременных разворотах



**Рис. 4.** Развороты по третьему варианту

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$\dot{y}_{14} = kU_0 - e^{\frac{C_1 - y_{24}}{kU_0 T}} \quad (23)$$

Для определения управления по третьему варианту с помощью итерационного алгоритма, изложенного выше, находим время разворота платформы  $t_{к\text{ пла}}$  и ОЭП  $t_{к\text{ оэп}}$  при оптимальном по быстродействию управлении. Находим тах- ( $t_{к\text{ пла}}, t_{к\text{ оэп}}$ ) и принимаем его за время разворота  $t_k$ . Не умаляя общности рассуждений, предполагаем, что время разворота платформы больше времени разворота ОЭП, поэтому разворот платформы осуществляем при оптимальном по быстродействию управлении, а разворот ОЭП – по одной из траекторий, изображенной на *рисунке 4*, за время  $t_k$ . Поиск такой траектории осуществляем с помощью итерационного алгоритма:

1. Определяем требуемые угол и угловую скорость разворота ОЭП в момент времени  $t_k$  по уравнениям движения цели.

2. Определяем время разворота ОЭП  $t_{к3}$  по траектории 3 и сравниваем его с  $t_k$ .

Если  $t_k < t_{к3}$ , разворот следует выполнять по траектории 1, а значением угловой скорости в момент окончания первого этапа задаваться в пределах  $\dot{y}_{13} < \dot{y}_{11} < \dot{y}_1$ . Время движения следует определять по формулам

$$\begin{aligned} y_{11} &= -T\ddot{y}_{11} - kU_0 T \ln(kU_0 - \dot{y}_{11}) + C_1, \\ \dot{y}_{21} &= e^{\frac{T\ddot{y}_{11} + y_{11} - C_2}{kU_0 T}} - kU_0, \\ t_{01} &= -T \ln \frac{\dot{y}_{11} - kU_0}{\dot{y}_0 - kU_0}, \\ t_{12} &= -T \ln \frac{\dot{y}_{21}}{\dot{y}_{11}}, \\ t_{23} &= -T \ln \frac{\dot{y}_{6\dot{e}} + kU_0}{\dot{y}_{21} + kU_0}. \end{aligned} \quad (24)$$

Если  $t_k > t_{к3}$ , разворот следует выполнять по траектории 2, а значением угловой скорости в момент окончания первого этапа задаваться в пределах  $\dot{y}_{14} < \dot{y}_{12} < \dot{y}_{13}$ . Время движения следует определять по формулам

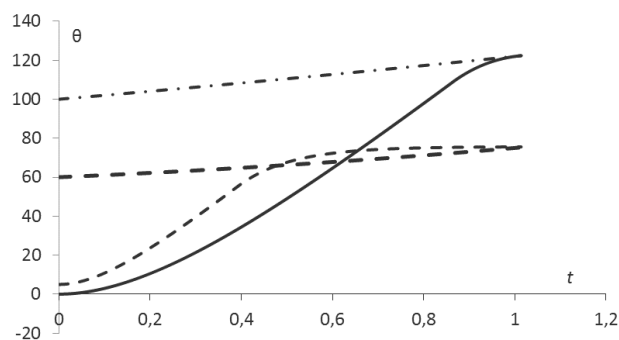


Рис. 5. Переходные процессы по второй траектории

$$\begin{aligned} y_{12} &= -T\ddot{y}_{12} - kU_0 T \ln(kU_0 - \dot{y}_{12}) + C_1, \\ \dot{y}_{22} &= kU_0 - e^{\frac{C_2 - y_{12} - T\ddot{y}_{12}}{kU_0 T}}, \\ t_{01} &= -T \ln \frac{\dot{y}_{12} - kU_0}{\dot{y}_0 - kU_0}, \\ t_{12} &= -T \ln \frac{\dot{y}_{22}}{\dot{y}_{12}}, \\ t_{23} &= -T \ln \frac{\dot{y}_{шк} - kU_0}{\dot{y}_{22} - kU_0}. \end{aligned} \quad (25)$$

Соотношения (24,25) получены путем математических преобразований соотношений (2,4,8)

3. В зависимости от выбранной в п.2 траектории задаемся произвольным значением  $\dot{y}_{11}$  или  $\dot{y}_{12}$  из рекомендованного для каждой траектории диапазона.

4. По формулам (24) или (25) находим  $t_{01}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{23}$  и сравниваем их сумму с  $t_k$ .

5. Если степень отклонения удовлетворяет заданным требованиям по точности, расчет завершается, в противном случае выбирается новое значение  $\dot{y}_{11}$  или  $\dot{y}_{12}$  путем половинного деления или другим способом и производится возврат в п. 4.

Для вышеприведенного примера  $t_{к\text{ оэп}} = 0,4904$  с,  $t_{к\text{ пла}} = 1,031$  с, выбираем  $t_k = 1,031$  с, поэтому разворот ОЭП необходимо производить по одной из траекторий, изображенных на *рисунке 5*. В конечной точке необходимо обеспечить  $y_{шк} = 75,626^\circ$ ,  $\dot{y}_{шк} = 15,155^\circ/\text{с}$ . По формулам (21) находим время движения по третьей траектории  $t_{к3} = 0,6857$  с и  $\dot{y}_{13} = 174,45^\circ/\text{с}$ . Поскольку  $t_{к3} < t_k$  разворот ОЭП необходимо производить по траектории 2. По формулам (23) находим угловую скорость  $\dot{y}_{14} = 173,94^\circ/\text{с}$ . В качестве первого приближения для  $\dot{y}_{12}$  выбираем  $\dot{y}_{14} + (\dot{y}_{13} - \dot{y}_{14})/2$ . Найдено решение  $t_{01} = 0,393$  с,  $t_{12} = 0,629$  с,  $t_{23} = 0,009$  с, для его поиска потребовалось 7 итераций, соответствующие переходные процессы приведены на *рисунке 5*.

### Заключение

Предложенные в работе алгоритмы обеспечивают одновременный разворот линии визирования ОЭП по азимуту и высоте за минимальное время для обеспечения наблюдения за подвижной целью. Из рассмотренных вариантов разворота наиболее предпочтительным является первый, поскольку алгоритм расчета для него самый простой и затраты энергии при выбранных начальных условиях и уравнении движения цели наименьшие. Второй вариант потребовал наибольшего расхода энергии. Алгоритм расчета по третьему варианту самый сложный. Однако не исключено, что при других исходных данных может лучшим оказаться второй или



## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

третий варианты, поэтому все они могут быть использованы.

### Литература

1. Крыжановский В.И., Щербаков В.И. Математическая модель двухконтурной следящей системы для наведения на цель оптико-электронного прибора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2019. Вып.667. С.337-345.
2. Крыжановский В.И., Трофимов И.А. Учет перекрестных связей в двухконтурной следящей системе для наведения на цель оптико-электронного прибора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2020. Вып.672. С.307-315.
3. Крыжановский В.И., Слатов С.В., Трофимов И.А. Оптимальное по быстродействию управление в двухконтурной следящей системе для наведения на цель оптико-электронного прибора // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2021. Вып.677. С.307-315.
4. Бесековский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. 4-е изд. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.
5. Крыжановский В.И., Горбулин В.И., Трофимов И.А. Алгоритм оптимального по быстродействию перенацеливания космического аппарата при наблюдении объектов различного типа // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2019. Вып.668. С.237-249.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 623

## ЭФФЕКТИВНОЕ КОДИРОВАНИЕ ОБРАЗОВ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

## EFFICIENT IMAGE ENCODING IN INFORMATION TRANSMISSION AND PROCESSING SYSTEMS

Владислав Валентинович Квашенников

доктор технических наук

ведущий научный сотрудник

АО «КНИИТМУ»

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

Тел.: 8 (910) 864-52-75

E-mail:kvashienvv@mail.ru

### Аннотация

Описано сжатие информации и получение эффективного кода в системах передачи, хранения и обработки информации на основе представления входной информации в виде последовательности образов. Под образом понимается некоторый код, записанный в памяти системы. Плохо формализуемое понятие смысла образа заменяется понятием наличия или отсутствия кода образа в памяти. Эффективное кодирование есть определение номера кода образа в памяти. Показано, что эффективный код образа получается при декодировании образа с учетом инвариантности образа к ошибкам и стираниям, а также к аффинным преобразованиям. Инвариантные преобразования образа образуют сферу образа. Коды, попадающие в сферу образа, соответствуют одному и тому же образу. Эффективное кодирование образа есть сопоставление сфере образа эталонного кода образа в центре сферы. Эталонных образов значительно меньше числа инвариантных образов сферы, что обеспечивает сжатие информации. Упростить вычисление эффективного кода образа возможно при фрагментации сложных образов – представления образов в виде объединения простых образов или других образов, число эталонных образов которых небольшое. Во многих случаях эффективное кодирование обеспечивает сжатие информации не хуже, чем традиционные методы сжатия. Приведено несколько примеров эффективного кодирования. Возможно совмещение эффективного кодирования образов и традиционных методов сжатия на основе частотного анализа.

**Ключевые слова:** сжатие информации, эффективное кодирование, инвариантные преобразования образа, фрагментация сложных образов.

### Summary

Information compression and efficient code generation in information transmission, storage and processing systems based on the representation of input information in the form of a sequence of images are described. An object is understood as some code written in the system memory. The poorly formalized concept of the meaning of the image is replaced by the concept of the presence or absence of the image code in memory. Effective encoding is the determination of the code number of the image in memory. It is shown that an effective image code is obtained by decoding the image, taking into account the invariance of the image to errors and erasures, as well as to affine transformations. Invariant transformations of the image form the sphere of the image. The codes that fall within the scope of the image correspond to the same image. Effective image encoding is a comparison of the sphere of the image reference code in the center of the sphere. Reference images are significantly less than the number of invariant images of the sphere, which provides information compression. It is possible to simplify the calculation of an effective image code when fragmenting complex images – representing images in the form of combining simple images or other images, the number of these images is small. In many cases, efficient coding provides information compression no worse than traditional compression methods. Several examples of effective coding are given. It is possible to combine efficient image encoding and traditional compression methods based on frequency analysis.

**Keywords:** information compression, efficient coding, invariant image transformations, fragmentation of complex images.

### Введение

Сжатие информации и получение эффективного кода источника повсеместно используется в системах передачи, хранения и обработки информации. В настоящее время разработано

большое число методов эффективного кодирования различных видов информации. Известны алгоритмы сжатия текстовой информации, графических и видео изображений и речи [1]. Эти алгоритмы основаны на частотном анализе

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

различных последовательностей символов и их декорреляции [2]. Последовательности символов считаются равнозначными и их смысл при сжатии информации не учитывается. Повысить коэффициент сжатия эффективного кодирования можно за счет представления входной информации в виде множества некоторых последовательностей символов, называемых образами. В литературе образ обычно определяется как последовательность символов или объект, имеющий смысл для рассматриваемой системы [3]. В настоящей работе дается другое определение образа. Под образом понимается последовательность символов, записанная в памяти системы. Плохо формализуемое понятие смысла образа заменяется понятием наличия или отсутствия кода образа в памяти. Входной последовательности сопоставляются код образа в памяти, а эффективное кодирование есть определение номера кода образа в памяти. Есть код в памяти, значит, входная последовательность является образом, а если – нет, то входная последовательность не является образом и системой не воспринимается. Система по своим критериям определяет образ, и записывает его код в память. Для нейронных сетей образами являются последовательности символов, на которых она обучается и которые запоминаются в памяти, а эффективный код образа получается при распознавании образа. Человек придает смысл и воспринимает те входные воздействия, которые он знает и которые отражены в памяти.

Образы инварианты к некоторым классам преобразований. Зрительные образы инвариантны к аффинным преобразованиям (масштабированию, сдвигу, вращению), к цветности, яркости и контрастности [9]. Речевые образы инвариантны к громкости и скорости произношения слов [10]. Образы также инвариантны к ошибочному и неполному описанию. Не слишком большое число ошибок и стираний символов позволяет правильно распознавать образы. Инвариантные преобразования образа образуют сферу образа. Коды, попадающие в сферу образа, соответствуют одному и тому же образу. Сферы образа формируются за счет избыточности входных последовательностей. Эффективное кодирование образа есть сопоставление сфере образа эталонного кода образа. Информационная часть избыточного кода образа является эффективным кодом образа. Эталонных образов значительно меньше числа инвариантных образов сферы, что обеспечивает сжатие информации.

Упростить вычисление эффективного кода образа возможно при фрагментации сложных образов – представления образов в виде объ-

единения простых образов или других образов, число эталонных образов которых небольшое. Во многих случаях эффективное кодирование обеспечивает сжатие информации не хуже, чем традиционные методы сжатия. Возможно совмещение эффективного кодирования образов и традиционных методов сжатия на основе частотного анализа.

### Кодирование образов

Образы обычно формируются естественным путем. На вход поступают последовательности символов, принадлежащие сфере образов. Допустим, двоичный код образа на входе

$$A = a_1 a_2 \dots a_n, \quad a_i \in GF(2).$$

В памяти хранятся слова кода

$$B = B_1 B_2 \dots B_M,$$

$$B_i = b_{1i} b_{2i} \dots b_{ni}, \quad b_{ji} \in GF(2).$$

Пусть  $A=B_i$ , тогда  $i$  есть эффективный код образа  $A$ .

Поскольку

$$k = \log_2 M < n,$$

то эффективное кодирование образа сжимает информацию. Избыточность кода образа  $r=n-k$ . При уменьшении  $k$  сжатие информации увеличивается. Сократить величину  $k$  возможно за счет фрагментации образов. Фрагментация есть представление образов в виде объединения других более простых образов. Образы можно условно разделить на два класса: простые образы и сложные образы. Сложные образы есть объединение простых образов или других сложных образов. Разделение сложных образов на простые или другие сложные образы есть фрагментация образов. Простые образы не разделяются на другие образы. Простые образы имеют небольшое число эталонных образов. При фрагментации образа число эталонных образов составляющих образов уменьшается, а коэффициент сжатия увеличивается.

Представим сложный образ как объединение сложных и простых образов

$$A = \bigcup_{i=1}^N A_i.$$

Пусть эталонные образы для образа  $A_i$  есть  $B_{1i} B_{2i} \dots B_{si}$  и данный образ распознается как  $B_{ji}$ , а  $s_i$  – число эталонных образов образа  $A_i$ . Эффективный код этого образа определяется как номер образа

$$F(A_i) = j_i,$$

а код сложного образа будет последовательностью эффективных кодов составляющих образов

$$F(A) = F(A_1) F(A_2) \dots F(A_N) = j_1 j_2 \dots j_N.$$

Число двоичных разрядов кода сложного образа

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$D = \sum_{i=1}^N \log_2(s_i).$$

Коэффициент сжатия образа

$$v = \frac{\sum_{i=1}^M n_i}{D}.$$

где  $n_i$  – блоковая длина образа  $B_i$ .

При небольшом числе эталонных образов  $s_i$  коэффициент сжатия образа может быть очень большим. Число эталонных образов сокращается при увеличении радиуса сферы образа. Многие естественные образы имеют большую избыточность и большой радиус сферы. Вычисление эффективного кода образов существенно сокращает число разрядов и упрощает преобразования образов в нейронных сетях.

Число разрядов образа  $A$

$$R = \sum_{i=1}^N n_i,$$

а число эталонных образов образа  $A$

$$Q = \prod_{i=1}^N s_i.$$

Число разрядов образа  $A$  равно сумме разрядов составляющих образов, а число эталонных образов образа  $A$  есть произведение эталонных образов составляющих образов. Поэтому число разрядов сложного образа возрастает значительно медленнее, чем число эталонных образов сложного образа.

### Декодирование образов

Эффективный код образа получается при декодировании или при распознавании образа. Известны два метода декодирования образа: переборное декодирование и с использованием обучаемых нейронных сетей.

Допустим, двоичный код образа на входе  $A$ , а эталонные образы в памяти  $B = B_1 B_2 \dots B_M$ . Декодирование будет заключаться в сравнении кодового слова на входе со всеми словами кода в памяти и выборе того слова, для которого мера расхождения, например расстояние Хемминга будет минимальным [9]

$$A := B_i \rightarrow \min \sum_j (a_j \oplus b_{ji}), \quad i = 1..M.$$

Алгоритм, реализующий переборное декодирование образов, представлен ниже.

Шаг1.  $i := 1; r_m := n$

Шаг2. Вычислить  $r = \sum_j (a_j \oplus b_{ji})$

Шаг3. Если  $r < r_m$  то  $r_m := r; iI := i$

Шаг4. Если  $i = M$  идти Шаг5, иначе  $i := i + 1$

идти Шаг2

Шаг5.  $A := B_{iI}$

Шаг6. Конец

Если на входе имеется последовательность

длины  $n$ , а на выходе – эффективный код образа длины  $k$ , то число операций переборного декодирования для определения эффективного кода оценивается

$$H = O(n \cdot 2^k).$$

Величина  $H$ , определяющая число операций при распознавании образа, есть сложность образа. Сложность образа растет значительно быстрее от числа эталонных образов  $k$ , чем от блоковой длины кода образа  $n$ . Переборное декодирование можно применять при небольшом числе эталонных образов даже, если блоковая длина кода образа будет довольно большой.

Для декодирования образов также используют нейронные сети. В этом случае обычно говорят о распознавании образов. Заметный прогресс в распознавании образов наметился с использованием глубоких сверточных нейронных сетей [17,18]. Нейронная сеть может быть использована для распознавания любых образов с учетом инвариантных преобразований и с исправлением ошибок и стираний, без задания соответствующих правил кодирования. Такой декодер является универсальным, не слишком сложен в реализации и обучаем для различных эталонных образов [19,20]. Однако сложность нейронной сети, как и переборного декодирования, быстро возрастает при увеличении числа эталонных образов.

Сложность нейронной сети определяется числом нейронов и связей между ними. При распараллеливании операций сложность сети пропорциональна количеству операций. Сложность распознавания образа растет значительно быстрее в зависимости от размерности эффективного кода (по экспоненциальному закону), чем в зависимости от размерности входной последовательности (по линейному закону).

### Многоуровневая иерархическая структура образов

Большинство образов, встречающихся на практических приложениях, имеют многоуровневую иерархическую структуру. Текст состоит из предложений, предложения – из слов, слова – из букв, изображения – из крупных фрагментов, крупные фрагменты изображения – из менее крупных фрагментов, речь – из отдельных фраз, слов и т.д. Существуют образы, которые не являются объединением других образов. Многие помехоустойчивые коды не являются объединением помехоустойчивых кодов меньшей мощности, хотя обобщенные каскадные коды строятся как объединение компонентных кодов.

Сложные образы, имеющие многоуровневую иерархическую структуру на основе других

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

сложных и простых образов, можно рассматривать как обобщенный каскадный 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. Обобщенный каскадный код первой ступени 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 ступени  $B_i^{(1)}$  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 ступени  $B_{i_2 \dots i_{r-2}}^{(r-2)}$  является объединением  $q_{r-1}$  различных кодов последней ступени  $B_{i_2 \dots i_{r-1}}^{(r-1)} (0 \leq i_{r-1} \leq q_{r-1} - 1)$ , имеющих параметры  $(n_{r-1}, q_{r-1}, d_r)$ .

Можно записать рекуррентные соотношения для кодов различных ступеней обобщенного каскадного кодирования [21]

$$B^{(0)} = \bigcup_{i_1=0}^{q_1-1} B_{i_1}^{(1)}, \quad B_{i_1}^{(1)} = \bigcup_{i_2=0}^{q_2-1} B_{i_2}^{(2)}, \quad \dots, \quad B_{i_2 \dots i_{r-2}}^{(r-2)} = \bigcup_{i_{r-1}=0}^{q_{r-1}-1} B_{i_2 \dots i_{r-1}}^{(r-1)}$$

при этом  $d_1 < d_2 < \dots < d_r$ .

Декодирование обобщенного каскадного кода начинают с последней ступени каскадного кода, определяя сначала простые образы. Затем декодируют коды предпоследней ступени каскадного кодирования, поднимаясь вверх, и т.д., вплоть до кода первой ступени кодирования.

### Примеры эффективного кодирования

В основе эффективного кодирования лежит представление входной информации в виде множества образов. Входным образам сопоставляются эталонные образы в памяти, а эффективное кодирование есть определение номера эталонного образа в памяти. При переборном декодировании в памяти хранятся безошибочные кодовые слова, а при распознавании образа в нейронной сети, она должна быть обучена на эталонных образах. Человек воспринимает только ту информацию, которая отражена в его памяти.

Эффективное кодирование образов является естественной для человека процедурой и на самом деле уже довольно давно используется для сжатия информации во многих в практических приложениях.

#### 1. Распознавание по словесному портрету человека

Словесный портрет – система описания человека с помощью стандартизованного набора характеристик. Например, если требуется идентифицировать человека по лицу, то сначала рас-

познаются простые образы лица человека: нос, рот, глаза, лоб, подбородок, особые приметы и т.д. Сложный образ лица есть объединение простых образов лица. Сначала распознаются простые образы лица. Распознавание простых образов лица выполняется по эталонным образам простых образов, хранящимся в памяти. 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.

Пусть коды простых образов будут  $F(B_1) = 0101, F(B_2) = 1011, \dots, F(B_8) = 1101$ .

Сложный образ лица есть объединение простых образов лица. Эффективный код сложного образа лица определяют по эффективным кодам простых образов лица как объединение эффективных кодов простых образов.

$$F(B) = F(B_1)F(B_2) \dots F(B_8) = 01011011 \dots 1101.$$

Код сложного образа определяет человека и его данные. Число различных эталонных образов в памяти определяет пользователь системы. Число эталонных образов можно взять равно столько, сколько требуется для распознавания, что сокращает размер эффективного кода и упрощает распознавание образов [23]. В примере словесный портрет задается 32 битами и обеспечивает коэффициент сжатия изображения лица человека, не менее 200-300, что существенно больше, чем при использовании традиционных алгоритмов сжатия изображений JPEG, JPEG2000 [24]. По словесному портрету можно довольно точно определить человека.

#### 2. Распознавание текстовой информации в речевых информаторах

Распознавание текста выполняется пословно. Текст является сложным образом, а слова составляют множество простых образов. Количество эталонных слов, записанных в памяти, определяет размер эффективного кода. В несложных текстах обычно используют не более 1000 различных слов, для нумерации которых в двоичном коде достаточно 10 бит. Значит, длина эффективного кода слова составляет 10 бит.

С другой стороны, если слово в среднем содержит 5 букв, то для его представления в двоичном коде, считая, что каждая буква алфавита кодируется 5 битами, используется примерно 25 бит. Длина двоичного кода слова без сжатия будет 25 бит. Таким образом, коэффициент сжатия эффективного кодирования будет равен 2,5. Это даже немного больше, чем в известных статистических алгоритмах сжатия Хаффмена или Шеннона-Фано [25].

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### 3. Эффективное кодирование команд телекодированного управления

Для дистанционного управления различными объектами, например БПЛА, используются команды телекодированного управления. Команды управления содержат постоянную часть, которая определяет тип команды управления, и переменную часть, задающую величину управляющего воздействия. Постоянные части команд есть эталонные образы, которые заранее записаны в память объекта управления. Команды при передаче по каналу связи могут быть искажены помехами. Поэтому, команды защищаются помехоустойчивым кодом, корректирующим ошибки и стирания. Помехоустойчивое кодирование образует сферу образа. При декодировании помехоустойчивого кода вычисляется эффективный код образа. Для нумерации команд управления достаточно 6 битового эффективного кода для постоянной части и 8 разрядного поля для переменной части команд, что значительно меньше, чем передается в канале связи с учетом избыточности помехоустойчивого кода.

### 4. Эффективное кодирование речи в формантном вокоде

Формантный вокодер (резонансный) передает средние частоты нескольких основных формант и их уровни, а также сигнал основного тона. Совокупность формант составляет множество простых образов. Фрагмент речи определенной длины, включающий несколько формант, например слово, представляет собой сложный образ речи. Количество различных эталонных формант, записанных в памяти, определяет размер эффективного кода образа. При числе формант, равном 64, для нумерации формант требуется 6 бит. Коэффициент сжатия формантных вокодеров составляет величину 50 и более, что сопоставимо с коэффициентом сжатия наиболее часто используемых алгоритмов сжатия речи с линейным предсказанием. Разборчивость речи при использовании формантных вокодеров превышает разборчивость аналоговой телефонной связи.

### Заключение

В основе эффективного кодирования лежит понятие образа. Образом называют последовательность символов, записанную в памяти. С образом связана сфера образа, получаемая при инвариантных преобразованиях образа. Коды, попадающие в сферу образа, определяются как один и тот же образ. За счет большой избыточности сферы образа обеспечивается высокое сжатие эффективного кодирования. Многие об-

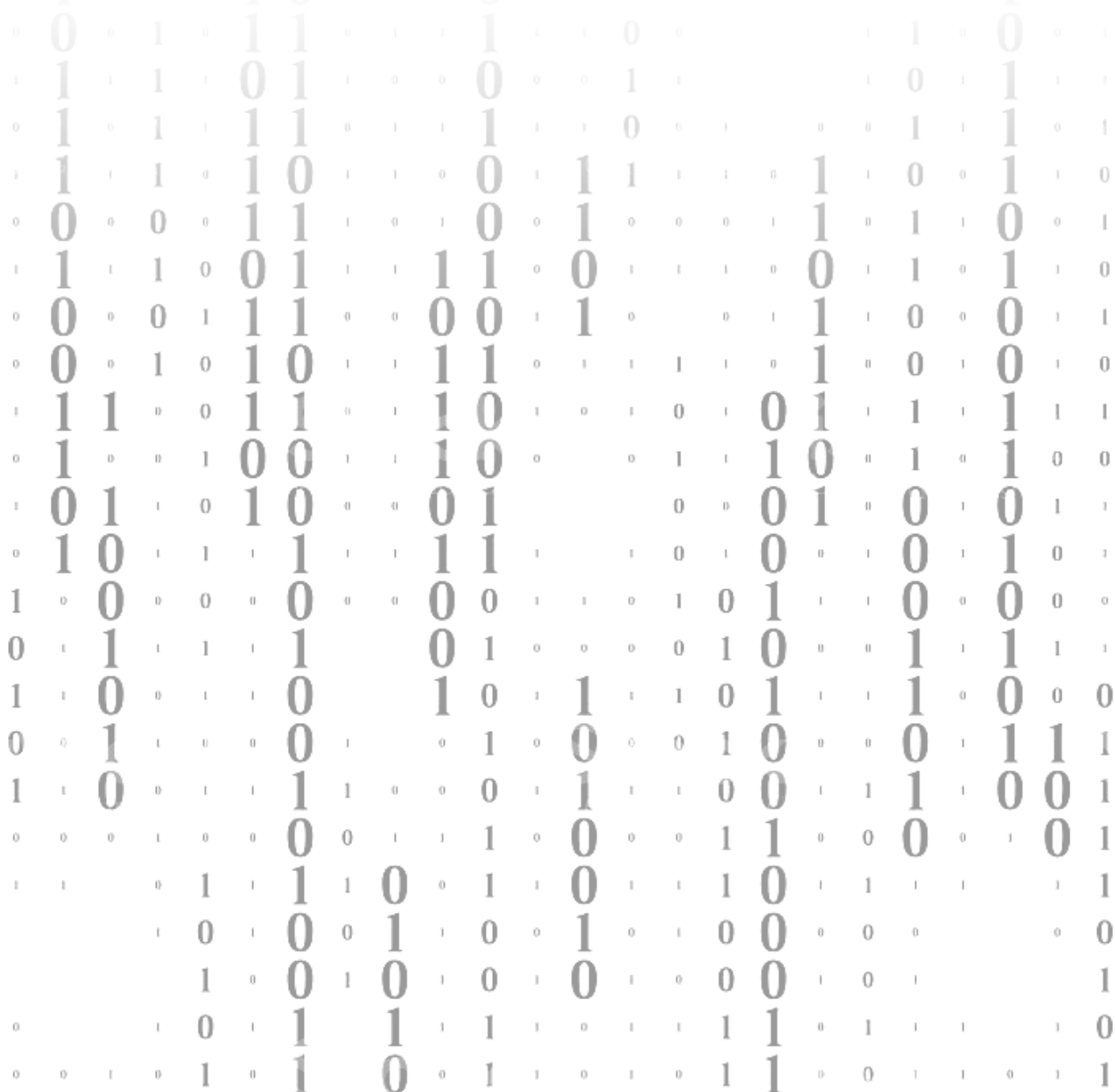
разы имеют многоуровневую иерархическую структуру, что позволяет строить сложные образы на основе простых и других образов, число эталонных образов которых небольшое. Фрагментация образов повышает коэффициент сжатия и упрощает вычисление эффективных кодов образов. Вычисление эффективного кода образа эквивалентно распознаванию образа и является одной из основных процедур, выполняемых нейронными сетями. Нейронные сети работают с эффективными кодами образа. Эффективные коды образов объединяются в коды сложных образов. Коды сложных образов могут распознаваться для получения эффективных кодов сложных образов. В свою очередь эффективные коды сложных образов также объединяются и т.д., до тех пор, пока не будет получен эффективный код, позволяющий принимать решения. Для человека эффективное кодирование является естественной процедурой, и давно используется, в том числе, во многих технических приложениях. Эффективное кодирование может быть использовано для исследования преобразований информации в нейронных сетях и для сжатия информации. Возможно совмещение эффективного кодирования с традиционными методами сжатия информации.

### Литература

1. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. М.: Диалог-МИФИ, 2002. 384 с.
2. 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.
3. Осмоловский С.А. Стохастические методы защиты информации. М.: Радио и связь, 2003. 320 с.
4. Блох Э.Л., Зяблов В.В. Обобщенные каскадные коды. М.: Связь, 1976. 240 с.
5. Гибсон У. Распознавание образов. М.: Вильямс, 2015. 384 с.
6. Амеликин 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.
7. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки: Пер. с англ. / Под ред. Р.Л. Добрушина, С.И. Самойленко. М: Мир, 1976. 594 с.
8. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь. М.: Сов. Радио, 1974. 720 с.
9. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Иностранная литература, 1963. 832 с.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

10. Мак-Вильямс Ф.Дж., Слоэн Н.Дж.А. Теория кодов, исправляющих ошибки: Пер. с англ. М.: Связь, 1979. 744 с.
11. Морелос-Сарагоса М. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005. 320 с.
12. Хайкин С. Нейронные сети: 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
13. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. Кн.1. Под ред. А.И. Галушкина. М.: ИПРРЖР, 2000.
14. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с.
15. Берёзкин А.А. Построение оптимальных нейронных декодеров блоковых кодов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2008. №5. С.34-41.
16. Зиновьев В.А. Обобщенные каскадные коды // Проблемы передачи информации, 1976. Т.12. Вып.1. С.5-15.
17. Блох Э.Л., Зяблов В.В. Обобщенные каскадные коды. М.: Связь, 1976. 240 с.
18. Квашенников В.В. Сравнительный анализ запоминания информации в биологических системах и в устройствах электронной памяти // Известия Института инженерной физики, 2021. №1(59). С.42-47.
19. Image Compression: The Mathematics of JPEG 2000 (англ.) // Modern Signal Processing. – MSRI Publications, 2003. – Vol.46. – P.185-221.
20. Мухин С.В. Одновременная передача данных и голоса через канал тональной частоты // Методы оценки систем и передачи данных. Сб. науч. тр. М., 1999. С.115-121.
21. Сэлмон Д. Сжатие данных, изображения и звука. М.: Техносфера, 2004. 368 с.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.85

## РАЗРАБОТКА РЕКУРРЕНТНО- СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ ОКРАСКИ ТЕКСТА

## DEVELOPING RECURRENT CONVOLUTIONAL NEURONET MODEL FOR TEXT SENTIMENT ANALYSIS

Владислав Евгеньевич Вершинин

аспирант

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2

Тел.: 8 (910) 864-46-80

E-mail: vershinin\_ve@mail.ru

### Аннотация

В данной работе рассматривается задача проектирования и разработки математической модели нейронной сети, которая будет сочетать в себе преимущества сверточных и рекуррентных моделей, а также ее дальнейшая программная реализация с использованием современных библиотек для машинного обучения. Актуальность задачи обусловлена стремительным развитием разнообразных ботов, умных помощников и систем, которые не могут обходиться без использования различных вариаций нейронных сетей, и чем более точной и производительной будет применяемая модель, тем эффективнее будет работать конечный продукт.

**Ключевые слова:** обработка естественного языка, рекуррентно-сверточная нейронная сеть, непоследовательные  $n$ -граммы, векторные представления слов.

### Summary

In this paper is dedicated to designing and developing a mathematical model of a neural network, which will combine the advantages of convolutional and recurrent models, as well as its further software implementation using modern libraries for machine learning. This problem is relevant because of the rapid development of a variety of bots, intelligent assistants and systems that can not do without the use of different variations of neural networks, and the more accurate and productive the model used, the more efficient the final product will work.

**Keywords:** natural language processing, recurrent convolutional neural network, non-consecutive  $n$ -gramm, word embedding.

### Введение

Natural Language Processing (NLP) – это крупная сфера информационных технологий, используемая для решения широкого спектра задач, включающего в себя поддержание поисковых алгоритмов, формирование рефератов и аннотаций к тексту, а также для внедрения методов машинного обучения для решения таких нетипичных задач, как распознавание речи, анализ запросов или тональности текста [1]. Однако все данные типы анализа основываются на токенизации – разделении потока текста на фрагменты, нахождении границы предложения, классификации и выделении отношений (между частями документа).

Необходимо отметить, что для всех задач по автоматизированной обработке текстов на естественном языке существует много проблем, возникающих в процессе решения. Неоднознач-

ность слов, структура текста, различные ошибки – это все, в большинстве случаев, значительно влияет на тональность входных данных.

Пусть  $X$  будет являться входной последовательностью, такой как предложение или документ. А каждый  $x_i$  – вектор, отображающий  $i$ -е слово последовательности. Тогда вектор последовательной  $n$ -граммы, заканчивающейся на позиции  $j$  будет получаться путем простой конкатенации соответствующих векторов слов. Нужно отметить, что в данном случае все вектора слов, выходящих за границы массива, будут просто заменяться нулевыми векторами.

Стандартный сверточный оператор параметризуется фильтром в виде матрицы, которая может представлять собой множество  $n$  меньших фильтровых матриц. Эти меньшие матрицы применяются к каждому  $x_i$  в векторе  $v_j$ , чтобы получить линейно преобразованное отображение.



## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Для всего уровня последовательности оператор приводит вектор  $v_j$  каждой из входящих  $n$ -грамм, таким образом исходная последовательность  $X$  преобразуется в последовательность отображений признаков.

Полученные значения признаков часто прогоняются через нелинейные функции, такие как гиперболический тангенс, также они могут быть объединены или уменьшены с помощью операций «max-pooling» или «sum-over» для дальнейших стадий обработки.

Итоговая архитектура может быть легко модифицирована путем замены базовых векторов  $n$ -грамм и сверточного оператора на другие способы вычисления карт признаков.

### Описание математической модели нейронной сети

Классическое вычисление карт признаков, где конкатенированные вектора слов линейно отображаются на координаты признаков, могут быть неэффективными для непосредственного захвата связанной информации в  $n$ -граммах [2]. В качестве улучшения операция конкатенации будет заменена на тензорное произведение. Рассмотрим опять 3-грамму  $(x_1, x_2, x_3)$  и соответствующее тензорное произведение  $(x_{1i} x_{2j} x_{3k})$ . Результатом тензорного произведения является трехмерный массив координат взаимосвязей, таких, что каждый  $i, j, k$  вход тензора задается произведением соответствующих координат векторов слов.

После того как каждая  $n$ -грамма последовательности в результате тензорного произведения стала представлять собой многомерный тензор, набор фильтров аналогично принял форму многомерных тензоров. Рассмотрим отображение 3-граммы  $(x_1, x_2, x_3)$  в представление признаков. Каждый фильтр – это трехмерный тензор с измерениями  $d \times d \times d$ . Набор из  $h$  фильтров, обозначаемый как  $T$ , тогда будет являться четырехмерным тензором с измерениями  $d \times d \times d \times h$ , где каждый  $d^3$  слой  $T$  представляет собой один из фильтров, а  $h$  – это количество подобных фильтров, т.е. размерность признаков. Результирующее  $h$ -мерное представление признаков для 3-граммы  $(x_1, x_2, x_3)$  получается путем умножения фильтра  $T$  и тензора 3-граммы.

Прямолинейное вычисление карт признаков будет занимать  $O(L^3)$ , где  $L$  – длина последовательности. В общем виде прямой перебор всех  $n$ -грамм будет занимать  $O(L^n)$ , операций. Эффективный способ вычисления может быть получен и реализован с использованием динамического программирования.

В качестве финального уточнения предлага-

ется добавить покомпонентные активационные функции, применяемые после вычисления каждого представления. Активационные функции ничем не будут отличаться от тех, что используются в обычных рекуррентных и сверточных нейронных сетях, т.е.,  $h[t] = g(c_3[t])^2$ , для выбранной активационной функции  $g()$ , например, линейную или тангенс [3]. В целом объединение признаков  $n$ -грамм будет занимать  $O(Ln)$  операций матричного сложения или умножения и будет оставаться линейным на всей длине последовательности.

После вычисления всех карт признаков наилучшим и наиболее простым решением является усреднение отображений признаков и передача результирующего вектора в Softmax уровень.

### Входные данные и вектора слов

На всех этапах работы с моделью, начиная от обучения и заканчивая тестированием и итоговыми прогонами, использовались входные данные из Stanford Sentiment Treebank [4].

Данный корпус данных состоит из 11855 простых предложений и фраз извлеченных из отзывов о фильмах. Данное множество было дополнительно обработано с помощью Stanford Parser, что позволило разбить исходное множество на 215154 уникальных фраз, каждое из которых впоследствии было промаркировано 3 экспертами.

В данном случае было принято решение разбить исходное множество стандартным способом и использовать 8545 фразы для обучения, 1655 для разработки итоговой модели и 1655 для тестирования. Данное разбиение применялось для многоуровневого анализа, т.е. фразы в выборки могли иметь тэги от 0 до 4 (всего 5 уровней, 0 – очень отрицательный, 4 – очень положительный).

Для разработанной модели используются общедоступные 300-мерные векторы слов GloVe, обученные на Common Crawl. Решение о выборе векторов слов, было принято после анализа эффективности данной выборки на основании последних работ по схожей тематике, например для нейросетей DAN и RLSTM [5].

### Конфигурация модели

Исходный код разработан на языке Python с использованием библиотеки Theano. В наилучшей модели сети используются 4 повторяющихся слоя с активацией ReLU и скрытым измерением  $d=150$  для каждого слоя. Выходные скрытые состояния  $h[t]$  каждого слоя усредняются по  $t$ , производится конкатенация усредненных векторов из 4 повторяющихся слоев и использу-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ется конкатенация в качестве входных данных для конечного слоя softmax. Для оптимизатора Adam используются гиперпараметры по умолчанию, а начальная скорость обучения 0,0005. Процесс обучения протекает максимум 80 эпох, и после каждой эпохи мы уменьшаем скорость обучения в 0,85 раза. Также применяется вероятность отсева 0,3 на входе и выходе каждого слоя. Коэффициент регуляризации L2 (т.е. снижение веса) устанавливается равным  $1e-6$ , а коэффициент уменьшения весов при увеличении расстояния между элементами непоследовательной n-граммы  $\lambda$  выбирался из {0.0, 0.3, 0.5} (фактор затухания).

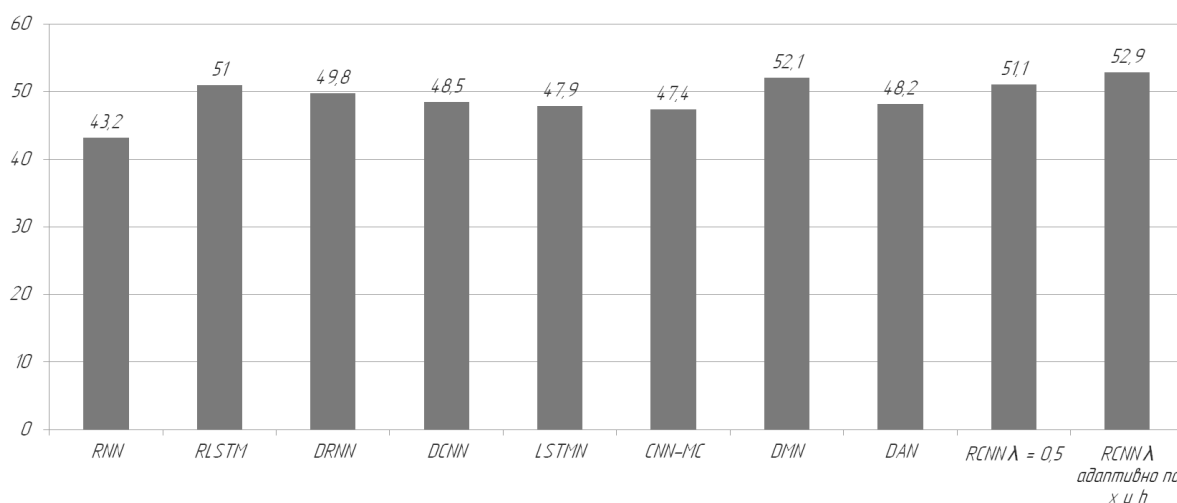
результатами других моделей полученных из опубликованных их авторами материалов. При многоаспектном определении эмоциональной оценки наша лучшая модель получила максимальную производительность, показав результат в 52.9%.

Также необходимо отметить, что в ходе проведения множества экспериментов исследуемая модель сохраняла относительную стабильность. На всех прогонах достигалась высокая, относительно аналогов точность со стандартным отклонением в 0.5% при различных инициализациях и варьирующихся значениях гиперпараметров.

Очередным преимуществом разработанной модели является то, что она в несколько раз быстрее, чем другие высокопроизводительные модели. Например, сверточная модель с многоканальной (CNN-МС) работает более 2400 секунд в

### Тестирование модели

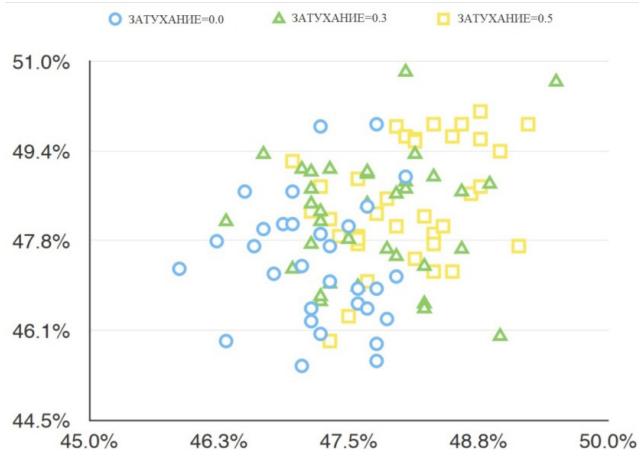
На *рисунке 1* приводятся результаты производительности нашей модели и ее сравнение с



**Рис. 1.** Сравнение эффективности многоуровневого определения эмоциональной окраски тестовых данных между RCNN и другими моделями нейронных сетей

Модель нейронной сети	Время работы (секунд)	
	За эпоху	За 10к примеров
RNN	-	-
RNTN	1657	1939
DRNN	431	504
RLSTM	140	164
DCNN	32	37
CNN-MS	2452	156
Bi-LSTM	-	-
LSTMN	-	-
PVEC	-	-
DAN	73	5
DMN	123	36
RCNN, $\lambda = 0.5$	28	33
RCNN, $\lambda$ адаптитивно по x	327	30
RCNN, $\lambda$ адаптитивно по x и h	445	28

**Рис. 2.** Сравнение времени обучения моделей нейронных сетей на данных из Stanford Sentiment Treebank



**Рис. 3.** Сравнение эффективности классификации настроений для последовательных (коэффициент убывания  $\lambda=0$ ) и непоследовательных n-грамм ( $\lambda>0$ )

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

течение периода обучения. Напротив, разработанная модель (с 3 слоями объектов) работает в среднем 28 секунд только с корневыми метками и в среднем 445 секунд со всеми метками. Информация о времени работы всех сравниваемых моделей представлена на *рисунке 2*.

Также был произведен анализ эффекта от использования при обучении и тестировании непоследовательных n-грамм. На *рисунке 3* приводится сравнение эффективности моделей в соответствии с выбором фактора затухания n-грамм  $\lambda$ . Обратите внимание, что когда  $\lambda=0$ , модель применяет извлечение признаков только к последовательным n-граммам и, следовательно, становится традиционным CNN, что приводит к постоянному снижению производительности. Этот результат подтверждает важность обработки непоследовательных n-грамм.

Также в результате эксперимента, проверялась эффективность функции активации выпрямленной линейной единицы (ReLU), сравнивая ее с отсутствием активации (или идентификационной активации  $f(x)=x$ ). В результате, разработанная модель с активационной функцией ReLU в большинстве случаев превосходит свой вариант без ReLU.

### Заключение

Результаты тестирования показывают, что модель RCNN, где разработанная карта признаков была заменена классической линейной картой, работает хуже, чем представленная модель. Это наблюдение подтверждает важность предложенного нелинейного тензорного отображения признаков.

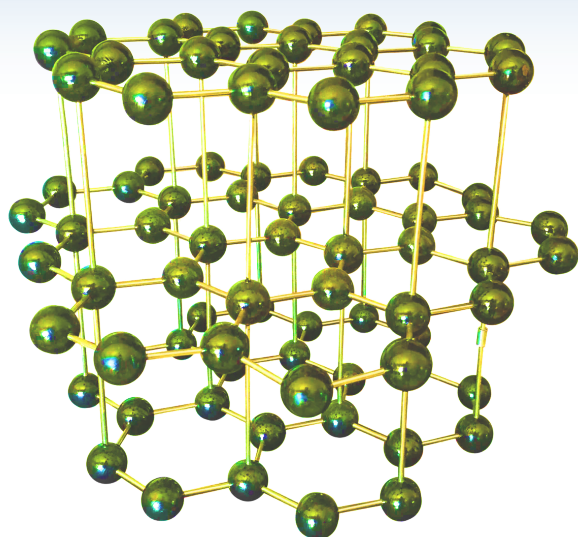
В результате проведения эксперимента с рекуррентно-сверточной моделью нейронной сети было получено, что модель обеспечивает максимальную производительность, относительно других известных архитектур сетей применяемых для решения задач определения эмоциональной оценки текстов.

### Литература

1. Alaa A. Qaffas, Improvement of Chatbots Semantics Using Wit.ai and Word Sequence Kernel: Education Chatbot as a Case Study, International Journal of Modern Education and Computer Science(IJMECS), Vol.11, No.3. Pp.16-22, 2019. DOI: 10.5815/ijmecs.2019.03.03.
2. Mikolov T. Efficient estimation of word representations in vector space / [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://arxiv.org/abs/1301.3781>.
3. Dipti Pawade, Avani Sakhapara, Mansi Jain, Neha Jain, Krushi Gada, Story Scrambler – Automatic Text Generation Using Word Level RNN-LSTM, International Journal of Information Technology and Computer Science(IJITCS), Vol.10, No.6. Pp.44-53, 2018. DOI: 10.5815/ijitcs.2018.06.05.
4. R. Socher Recursive deep models for semantic compositionality over a sentiment treebank. Proceedings of the conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP). Vol. 1631. Citeseer. 2013. P. 1642.
5. K.S. Tai, R. Socher, C.D. Manning. Improved semantic representations from treestructured long short-term memory networks / [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://arxiv.org/abs/1503.00075>.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.942



### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИФФУЗИИ

### SIMULATION OF THE DISTRIBUTION OF DOPANTS IN A SEMICONDUCTOR AT VARIOUS TEMPERATURES AND TIMES DURING THERMAL DIFFUSION

**Анатолий Викторович Мазин**  
доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Защита информации»  
ФГБОУ ВО Калужский филиал  
МГТУ имени Н.Э. Баумана  
Адрес: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2  
Телефон. +7 (910) 915-58-25  
E-mail: mazinav@yandex.ru

**Алексей Леонидович Ткаченко**  
кандидат технических наук  
доцент кафедры «Информатика и  
информационные технологии»  
ФГБОУ ВО Калужский государственный  
университет им. К.Э. Циолковского  
Адрес: 248023, г. Калуга, ул. Степана Разина, д. 26  
Телефон. +7 (4842) 22-04-06  
E-mail: tkachenkoal@tksu.ru

#### Аннотация

Перед проведением некоторых технологических процессов необходимо теоретически рассмотреть их модель, которая была построена в среде MathCAD. Моделирование позволяет без лишних затрат определить оптимальные условия проведения операции для получения нужного результата. В данной работе проведен анализ для некоторых частных случаев протекания процесса термической диффузии с использованием разработанной математической модели, приведена зависимость распределения легирующей примеси в кристалле, определена эффективность влияния различных факторов на глубину залегания p-n-перехода.

**Ключевые слова:** моделирование термической диффузии, среда MathCAD, ионная имплантация, кристаллическая решетка, легирование примеси.

#### Summary

Before carrying out some technological processes, it is necessary to theoretically consider their model, which was built in the MathCAD environment. Modeling allows you to determine the optimal conditions for the operation without unnecessary costs to obtain the desired result. In this paper, an analysis is carried out for some special cases of the thermal diffusion process using the developed mathematical model, the dependence of the distribution of the dopant in the crystal is given, the effectiveness of the influence of various factors on the depth of the p-n junction is determined.

**Keywords:** thermal diffusion modeling, MathCAD medium, ion implantation, crystal lattice, doping of impurity.

#### Введение

В микроэлектронной промышленности для изготовления полупроводников с различными типами проводимости и создания в них p-n-перехода широко используют процесс термической диффузии, при котором легирующая примесь образует растворы внедрения или замещения. С достижением определенной температуры (>850°C) примесные атомы, уменьшая свою концентрацию, начинают активно распространяться из приповерхностной области в глубь полупроводника вследствие теплового движения. Именно этим механизмом проникновения при-

меси в кристаллическую решетку полупроводника определяется процесс термической диффузии [1-3].

Если в ионной имплантации легирование ионов может осуществляться при комнатной температуре и не зависит от нее, то в термической диффузии температура является одним из параметров, определяющих скорость и характер протекания процесса. Действительно, по второму закону Фика

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}, \quad (1)$$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

где  $N$  – концентрация примеси;  
 $t$  – время диффузии;  
 $x$  – координата, вдоль которой изменяется концентрация;  
 $D$  – коэффициент диффузии, определяющийся уравнением

$$D = D_{0e} \frac{E_a}{kT} \quad (2)$$

Следовательно, распределение концентрации примеси по координате связано как с температурой, так и с временем диффузии – чем выше значения этих параметров, тем глубже примесные атомы проникают внутрь полупроводника [4-6]. Именно эту зависимость мы будем рассматривать, моделируя процесс в среде MathCAD.

### Основная часть

Исходные данные:

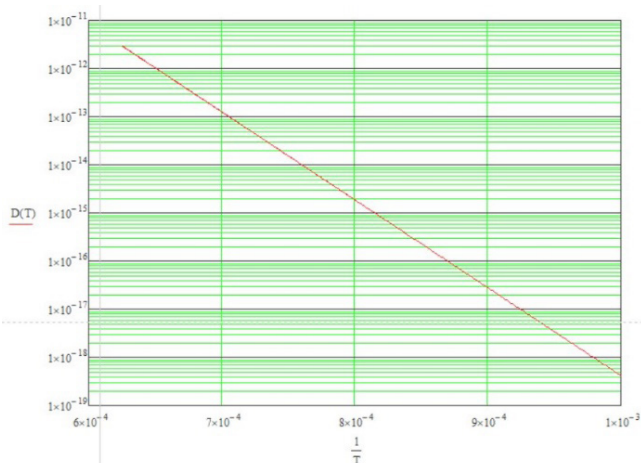
Полупроводник *Si* (Поверхностная концентрация атомов примеси  $N_0 = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , Максимальная температура диффузии  $T_{\max} = 1200^\circ\text{C}$ ).

Примесь *In* (Поверхностная концентрация атомов примеси  $N_0 = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , Максимальная температура диффузии  $T_{\max} = 1200^\circ\text{C}$ ).

Полупроводник *Si* (Поверхностная концентрация атомов примеси  $N_0 = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , Максимальная температура диффузии  $T_{\max} = 1200^\circ\text{C}$ ).

Используя формулу (2) и подставив в нее исходные данные, приведем зависимость коэффициента диффузии от температуры в пределах 1000–1600 К (рисунки 1).

Рассмотрим диффузию из бесконечного источника примеси (БИП). Данный процесс получил свое название за счет непрерывного поступления примеси из внешнего источника к поверхности кристалла, тем самым обеспечивая постоянную концентрацию примесных атомов в приповерхностной области полупроводника



**Рис. 1.** Температурная зависимость коэффициента диффузии индия в кремнии

( $N_0 = \text{const}$ ). Решая дифференциальное уравнение (1) с соответствующими для данного процесса начальными и граничными условиями, получим выражение:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (3)$$

Построим графики зависимости диффузии из БИП по полученному выражению (3), изменяя значения температуры и времени (рисунки 2).

Определим координаты  $p$ - $n$ -переходов:

- 1)  $X_{p-n} = 0,427 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  для  $N_{10}$  при  $T_{\min}$  и  $t_{\min}$  (линия красного цвета);
- 2)  $X_{p-n} = 2,155 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  для  $N_{11}$  при  $T_{\max}$  и  $t_{\min}$  (линия темно-синего цвета);
- 3)  $X_{p-n} = 0,558 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  для  $N_{12}$  при  $T_{\min}$  и  $t_{\max}$  (линия синего цвета).

Из рисунка 2 видно, что при повышении температуры и времени диффузии (темно-синяя и синяя линии соответственно) примесь эффективнее проникает в кристалл, тем самым увеличивая глубину залегания  $p$ - $n$ -перехода.

В отличие от предыдущего процесса при диффузии из источника ограниченной мощности примесь извне не поступает. Соответственно, начинается перераспределение концентрации примесных атомов в глубь полупроводника с последующим уменьшением их числа в приповерхностной области. Решая дифференциальное уравнение (1) с уже другими начальными и граничными условиями, получим соотношение

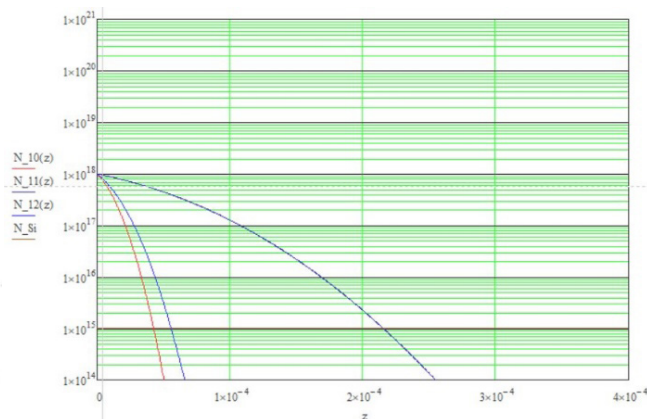
$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \left[ - \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где  $Q$  – количество атомов примеси, приходящихся на единицу площади.

Исходя из уравнения (4), построим графики зависимости диффузии от значений температуры и времени (рисунки 3).

Отметим координаты  $p$ - $n$ -переходов:

- 1)  $X_{p-n} = 0,482 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  для  $N_{20}$  при  $T_{\min}$  и  $t_{\min}$  (ли-



**Рис. 2.** Зависимость распределения примеси при диффузии из БИП от различных значений температур и времени

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ния красного цвета);

2)  $X_{p-n} = 2,434 \cdot 10^{-4}$  см для  $N_{21}$  при  $T_{\max}$  и  $t_{\min}$  (линия темно-синего цвета);

3)  $X_{p-n} = 0,631 \cdot 10^{-4}$  см для  $N_{22}$  при  $T_{\min}$  и  $t_{\max}$  (линия синего цвета).

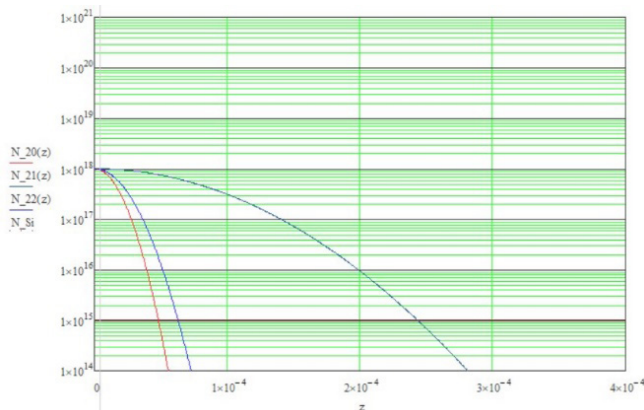
Также, как и с диффузией из БИП, при данном процессе примесь активнее проникает в полупроводник, если увеличивать температуру и время диффузии. Следовательно,  $p$ - $n$ -переход располагается глубже.

**Примечание.** Так как диффузия из ограниченного источника примеси (ОИП) является последующим процессом после диффузии из БИП, то концентрация примеси на поверхности полупроводника должна быть меньше  $N_0$ . Однако из рисунка 3 видно, что линии берут своё начало именно из этой координаты. Это объясняется тем, что эти два процесса были смоделированы отдельно и не зависят друг от друга. Поэтому стоит рассмотреть более обобщенный и приближенный к практике случай, а именно двухстадийную диффузию.

Данный процесс является технологическим способом легирования примеси и проводится в два этапа: первый – диффузия из БИП, называемая «загонкой» примеси и второй – диффузия из ОИП, называемая «разгонкой» примеси. Соответственно, на первой стадии примесь внедряется в поверхность полупроводника, и ее концентрация остается постоянной, на второй – перераспределяется по кристаллу. Таким образом в зависимости от температуры и длительности диффузии можно контролировать глубину залегания  $p$ - $n$ -перехода.

Рассмотрим профиль распределение легирующей примеси для двух значений температур:  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  (по умолчанию выберем минимальные значения времени:  $t_{\text{зар1}}$  и  $t_{\text{разг1}} = t_{\min}$ ) (рисунки 4).

Координаты  $p$ - $n$ -переходов равны:



**Рис. 3.** Зависимость распределения примеси при диффузии из ОИП от различных значений температур и времени

1)  $X_{p-n} = 0,401 \cdot 10^{-4}$  см для  $N_0$  при  $T_{\min}$ ,  $t_{\text{зар1}}$  и  $t_{\text{разг1}}$  (линии красного цвета);

2)  $X_{p-n} = 2,025 \cdot 10^{-4}$  см для  $N_1$  при  $T_{\max}$ ,  $t_{\text{зар1}}$  и  $t_{\text{разг1}}$  (линии синего цвета).

Аналогично предыдущим случаям, с повышением температуры диффузии примесь глубже проникает в кристаллическую решетку полупроводника.

Теперь рассмотрим профиль распределение легирующей примеси от временной зависимости протекания первого и второго этапов двухстадийной диффузии. Для этого разберем 3 случая: первый – при  $t_{\text{зар1}}$  и  $t_{\text{разг1}}$ ; второй – при  $t_{\text{зар2}}$  и  $t_{\text{разг1}}$ ; третий – при  $t_{\text{зар1}}$  и  $t_{\text{разг2}} = t_{\max}$  (по умолчанию температура диффузии равна  $T_{\min}$ ) (рисунки 5)

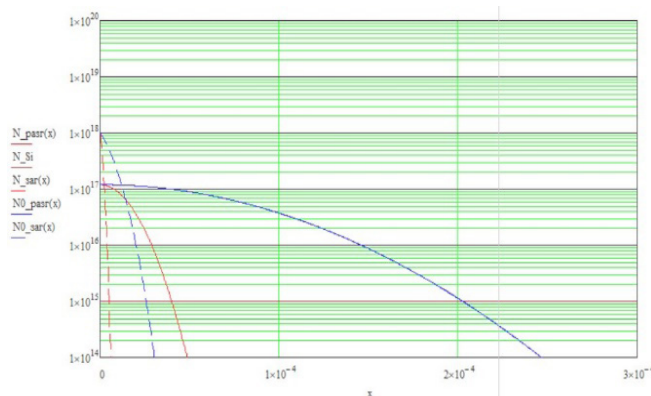
$P$ - $n$ -переходам соответствуют следующие координаты:

1)  $x_{p-n} = 0,401 \cdot 10^{-4}$  см для  $N_0$  при  $T_{\min}$ ,  $t_{\text{зар1}}$  и  $t_{\text{разг1}}$  (линии красного цвета (красная пунктирная совпадает с коричневой пунктирной линией));

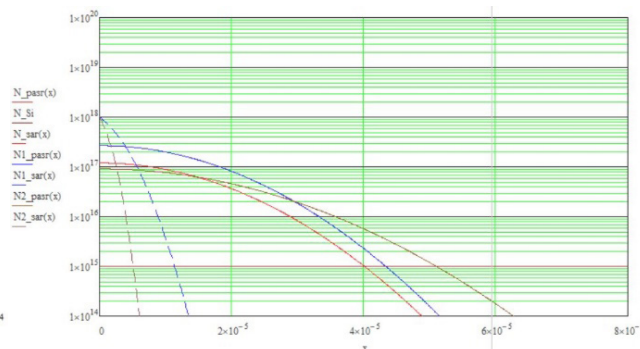
2)  $x_{p-n} = 0,433 \cdot 10^{-4}$  см для  $N_2$  при  $T_{\min}$ ,  $t_{\text{зар2}}$  и  $t_{\text{разг1}}$  (линии синего цвета);

3)  $x_{p-n} = 0,510 \cdot 10^{-4}$  см для  $N_3$  при  $T_{\min}$ ,  $t_{\text{зар1}}$  и  $t_{\text{разг2}}$  (линии коричневого цвета).

Из рисунков 4 и 5 видно, что красная линия



**Рис. 4.** Зависимость распределения примеси при двухстадийной диффузии от температуры (пунктирными линиями обозначен первый этап, сплошными линиями – второй)



**Рис. 5.** Зависимость распределения примеси от длительности первых и вторых этапов двухстадийной диффузии

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

характеризует одну и ту же зависимость и приведена для сравнения других. При анализе графиков, изображенных на *рисунке 5*, можно сделать вывод о том, что при двухстадийной диффузии распределение примеси, очевидно, тем глубже, чем выше длительность каждого из этапов.

### Заключение

В заключение отметим, что температурная зависимость распределения легирующей примеси куда значительнее, нежели временная. Однако в технологии диффузионный процесс не проводится при температуре  $>1250^{\circ}\text{C}$ , и потому некоторые операции могут длиться по несколько часов в силу менее строгих временных ограничений. В зависимости от того, какой p-n-переход необходим, задают оптимальные значения температуры и времени диффузионного процесса, предварительно подобрав необходимые параметры на полученных моделях.

### Литература

1. Серегина Е.В. Статистический анализ модели коллективного движения неосновных носителей заряда с использованием проекционного метода / Е.В. Серегина, А.М. Макаренков, М.А. Степович // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012. № 4. С.47.
2. Макаренков А.М. Проекционный метод Галеркина решения стационарного дифференциального уравнения диффузии в полубесконечной области / А.М. Макаренков, Е.В. Серегина, М.А. Степович // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2017. Т.57. №5. С.801-813. DOI 10.7868/S0044466917050076.
3. Гагарин Ю. Е. Интервальное оценивание диффузионной длины неосновных носителей заряда в катодолюминесцентной микроскопии. Результаты математического моделирования / Ю.Е. Гагарин, В.И. Петров, М.А. Степович // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2004. Т.68. №9. С.1338-1341.
4. Charge defectiveness of MOS structures insulator layers / G.G. Bondarenko, V.V. Andreev, A.A. Stolyarov [et al.] // Fizika i khimiya obrabotki materialov, 2001. №4. Pp. 94-99.
5. Mathematical simulation of distribution of minority charge carriers, generated in multy-layer semiconducting structure by a wide electron beam1 / I.V. Burylova, V.I. Petrov, M.G. Snopova, M.A. Stepovich // Физика и техника полупроводников, 2007. Vol.41. №4. P.458-461.
6. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high fields / G.G. Bondarenko, V.V. Andreev, A.A. Stolyarov, A.L. Tkachenko // Vacuum, 2002. Vol.67. №3-4. Pp.617-621. DOI 10.1016/S0042-207X(02)00262-2.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.89

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРСОНАЛА, ДОПУСКАЕМОГО К ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

## QUALITY ASSESSMENT OF PERSONNEL ALLOWED TO OPERATION OF POTENTIALLY HAZARDOUS FACILITIES

**Виталий Владимирович Чуринов**

кандидат технических наук  
старший научный сотрудник  
АНО «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (903) 586-20-10  
E-mail: ostss@iifmail.ru

**Андрей Игоревич Ефимако**

научный сотрудник  
АНО «ИИФ»

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: 8 (916) 777-39-25  
E-mail: ostss@iifmail.ru

**Олеся Витальевна Чуринова**

студентка

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Адрес: 105005, Москва,

ул. 2-я Бауманская, д. 5

Тел.: 8 (919) 779-95-98

E-mail: o.churinova@list.ru

### Аннотация

Статья посвящена разработке комплексного методического подхода к сепарированию триггерных показателей качества персонала, допускаемого эксплуатировать потенциально-опасные объекты. В статье показан пример использования нейронной сети Хебба и метода факторного анализа для решения задач классификации и уменьшения размерности данных с последующим сепарированием триггерных показателей качества персонала, оказывающих ключевое значение на решение о его допуске к эксплуатации потенциально-опасных объектов.

**Ключевые слова:** потенциально-опасный объект, показатель качества персонала, нейронная сеть, «триггерный» показатель качества персонала, категория сотрудника, группа показателей качества.

### Summary

The article is devoted to the development of an integrated methodological approach to the separation of trigger indicators of the quality of personnel allowed to operate potentially hazardous facilities. The article shows an example of using the Hebb neural network and the factor analysis method to solve the problems of classification and data dimensionality reduction with subsequent separation of trigger indicators of personnel quality, which are of key importance for the decision on its admission to the operation of potentially hazardous facilities.

**Key words:** potentially dangerous object, personnel quality indicator, neural network, «trigger» personnel quality indicator, employee category, group of quality indicators.

Эксплуатация потенциально-опасных объектов (ПОО) всегда сопрягается с человеческим фактором.

В настоящее время созданы и совершенствуются критичные системы отбора и допуска персонала к эксплуатации ПОО [1].

С усовершенствованием конструкций ПОО и развитием методик определения пригодности персонала поток разнородной информации, используемой для оценки качества сотрудников эксплуатирующих ПОО, растет в геометрической прогрессии [2].

В связи с этим остро стоит задача сепарирования триггерных показателей качества, характеризующих сотрудников для своевременного совершенствования их на этапах подготовки специалистов.

На рисунке 1 приведена комплексная схема сепарирования триггерных показателей качества персонала, допускаемого к эксплуатации ПОО.

Рассмотрим методический подход сепарирования триггерных показателей качества персонала, допускаемого к эксплуатации потенциально-опасных объектов [3].

1. Сбор и обобщение информации о тестируемом сотруднике.

Сбор и обобщение информации о качественных характеристиках сотрудников осуществляется на протяжении всего их жизненного пути:

$$F_{кат.} = \{F_{д}, F_{ид}\}; F_{кат.} = (L_1 T_1, L_2 T_2, L_3 T_3, L_4 T_4, L_5 T_5, L_6 T_6, \dots, L_n T_n) V_d, \quad (1)$$

где  $F_d$  – функция, характеризующая категорию «допущен» к эксплуатации ПОО;



## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$F_{ид}$  – функция, характеризующая категорию «не допущен» к эксплуатации ПОО;

$T_k$  – переменная, отражающая периоды тестирования;

$L_n$  – переменная, характеризующая информацию по соответствующим тестирующим службам.

$V_d$  – виды деятельности персонала.

Очевидно, что группы специалистов из состава комиссий по допуску будут оценивать тестируемого сотрудника по-разному и эта информация (вербальная, цифровая) будет получена различными способами. Так же очевидно, что особую ценность будут представлять данные о качестве тестируемого сотрудника в реальном масштабе времени. Эта информация будет получена из внеплановых тестов, различных жизненных ситуаций данного сотрудника, влияние

которых может отложить существенный отпечаток в его сознании и привести к нестандартным ситуациям при эксплуатации ПОО [1]. Анализ и объединение такой информации, затруднены, вследствие того, что неизвестна модель, объединяющая всю информацию о каждом тестируемом сотруднике. Такая модель может быть создана в том случае, если имеется определенный опыт моделирования категорий персонала, эксплуатирующего ПОО, существуют проанализированные данные о результатах инцидентов, произошедших по вине человека, при этом могут использоваться протоколы тестовых испытаний персонала. Таким образом, результатом данного этапа будет являться набор показателей, характеризующих сотрудника эксплуатирующего ПОО. Для гибкого использования эта информация переводится в двоичную систему исчисления [1].



**Рис. 1.** Комплексная схема сепарирования триггерных показателей качества персонала, допускаемого к эксплуатации ПОО

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

2. *Классификация показателей (на «значимые» и «малозначимые»), характеризующих сотрудника.*

В настоящее время для решения задач классификации в условиях наличия неопределенности используют инструментальный нейронных сетей [4]. Модель оценки качества тестируемого сотрудника может быть реализована с помощью нейронной сети.

Для решения поставленной задачи наиболее применимы нейронные сети (НС), обучаемые по методу Хебба («усиление наиболее часто взаимодействующих связей и ослабление менее взаимодействующих»). Реализация настройки весовых коэффициентов НС осуществляется методом главных компонент в его классическом варианте, т.е. определение собственных значений ковариационной матрицы. Это позволяет уменьшать количество выходных параметров НС без боязни потери большого числа информации при генерации образа. Следует отметить, что самоорганизующиеся карты Кохонена и НС Хебба обучаются без учителя. Однако, самоорганизующиеся карты Кохонена требуют заметно большего количества вычислительных операций, а это сказывается на времени работы НС. Также стоит отметить, что самоорганизующиеся карты Кохонена зависят от оценки аналитика и длительность процесса обучения зависит от этого параметра. Особо хочется отметить, что НС Хебба, обучается все время жизни, что делает ее более адаптивной к изменениям входных данных [4].

Используя НС Хебба и метод отсечения, произведем разбиение показателей качества персонала, допускаемого к эксплуатации ПОО, на два класса: «значимые» и «малозначимые».

Представленная комплексная схема сепарирования триггерных показателей персонала, допускаемого к эксплуатации ПОО, показывает, что весь разнородный поток информации характеризующей качества сотрудника можно разделить на классы «значимые» и «малозначимые». При этом нельзя забывать о совокупностях разнородной информации, которые в определенном составе оказывают влияние на категорию сотрудника.

Особо необходимо отметить группу «дремлющих» показателей качества, которые при определенных условиях переходят в группу «значимых» показателей и оказывают ключевую роль на категорию допускаемого к эксплуатации ПОО персонала. Не стоит забывать, что один и тот же сотрудник может под воздействием внешних факторов менять свои качественные характеристики и переходить в категорию «не допущенных» к эксплуатации ПОО, что в свою очередь может привести к

нестандартным ситуациям при эксплуатации ПОО.

3. *Уменьшение размерности данных характеризующих сотрудника, допускаемого к эксплуатации ПОО.*

На этом этапе необходимо разбить «малозначимые» показатели на «незначимые» и «дремлющие» с установлением для последних скрытых факторов, меняющих их класс на «значимые».

Основным методом для уменьшения размерности данных, в настоящее время, остается факторный анализ [5,6]. Факторный анализ (ФА) – это подход, который широко используется в экономике, психологии, социологии и др. Основными задачами ФА являются:

- а) установление зависимости между переменными;
- б) сокращение числа переменных.

Идея метода состоит в установлении скрытых факторов, влияющих на переменные, с помощью анализа матрицы корреляций исходных данных. После этого представляется возможным отбросить те данные, изменение которых, оказывает незначительное влияние на качество исследуемого сотрудника. Факторный анализ является многомерным методом, для разных случаев представления данных и через разные способы их обработки [5,6].

Наиболее подходящим методом для решения поставленной задачи является один из методов факторного анализа – метод главных компонент. Суть подхода этого метода к задаче уменьшения размерности данных заключается в том, что оцениваются наиболее важные данные (изменения которых максимальны), после вычисления собственных чисел и собственных векторов ковариационной матрицы исходных данных. Использование процедуры ортогонального вращения фактора в методе главных компонент может быть применено при генерации образа сотрудника эксплуатирующего ПОО, так как основная идея данного метода совпадает с идеей выделения образа, как совокупности главных характеристик объекта, с учетом возможных нелинейных зависимостей в значениях переменных [5,6].

Особо хочется отметить, что «незначимыми» показателями нельзя пренебрегать, так как они, в определенных совокупностях, могут влиять на категорию сотрудника.

4. *Объединение значимых показателей.*

На этом этапе суммируются значимые показатели качества персонала, полученные на втором и третьем этапе.

5. *Сепарирование триггерных показателей качества персонала.*

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

На данном этапе пошагово осуществляется изменения значений показателей, характеризующих категорию сотрудника, эксплуатирующего ПОО, на величину « $e$ » (« $e$ » > 0) [2].

При решении задачи по определению категории сотрудников, допускаемых к эксплуатации потенциально опасных объектов на основе нейросетевой системы поддержки принятия решений сформирован ряд утверждений и условий [2]:

1) В индивидуальной выборке набора показателей качества сотрудника существует хотя бы один «триггерный» показатель, характеризующий сотрудника (лежащий в области  $1, \dots, m$ , где  $m$  – объем индивидуальной выборки сотрудника), который при изменении своего значения меняет категорию сотрудника на противоположную.

$\exists \{X_{i1}, \dots, X_{im}\} \in U$  – индивидуальная выборка набора показателей качества сотрудника, где ( $m \leq \infty$ ).

$$\forall X_i \in \{0, 1\} \quad U = \{0, 1\}^m \quad \#U = 2^m \quad (2)$$

$\exists \{X_{j1}, \dots, X_{jp}\} \in U_p$  – рациональная совокупность показателей качества сотрудника;

$$\forall X_j \in \{0, 1\} \quad U_p \in U \quad U_p = \{0, 1\}^p \quad \#U < \#U_p = 2^p \quad (3)$$

$$U = c \in A \cup c \in B$$

$$\{X_{i1}, \dots, X_{j1}, \dots, X_{im}\} \in c \in A$$

$$\{X_{i1}, \dots, \bar{X}_{j1}, \dots, X_{im}\} \in c \in B. \quad (4)$$

2) Показатели, обладающие «квазитриггерным» эффектом, приводят к резкому изменению функции состояния системы на очередном этапе, но не изменяют категорию сотрудника (рис. 2). При этом существует такое значение  $e$ , сколь угодно малое:

$$Fi + e = \pm 1 \quad (5)$$

Сотрудник может быть двух категорий: «допущен» –  $F_d$  или «не допущен» –  $F_{нд}$  к эксплуатации потенциально опасных объектов [2].

Представим это в двухосевой системе координат (рис. 3).

Показатели, обладающие свойствами «квазитриггерного» эффекта, будут отнесены в класс «весомых», а показатели, обладающие свойствами менять категорию персонала на противоположную (например, был допущен к эксплуатации ПОО, а стал – не допущен), при незначительном изменении своих значений на величину « $e$ » – «триггерными».

«Триггерные» показатели – определенные показатели индивидуальной выборки сотрудника, характеризующих его качество, незначительное изменение значений которых приводит к изменению категории сотрудника на противоположную [2].

Свойства этих показателей мало изучены, хотя влияние их на определение категории сотрудника является решающим. Значит, к этим показателям качества сотрудника, и условиям при которых их значение изменяется, нужно уделять особое внимание.

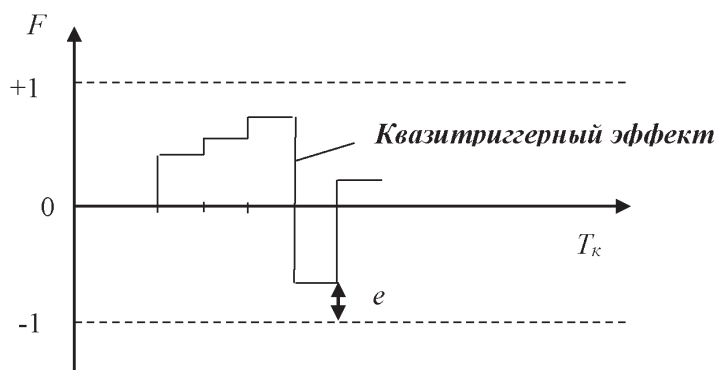


Рис. 2. «Квазитриггерный» эффект

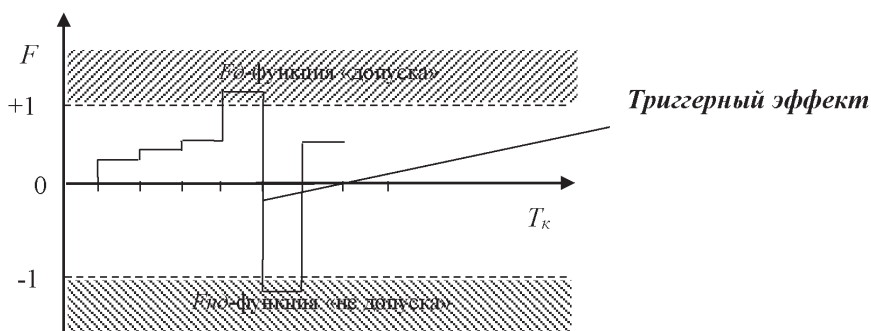


Рис. 3. Формирование категорий сотрудника в двух осевой системе координат

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Своевременное сепарирование данных групп показателей качества сотрудников позволит совершенствовать их на этапах подготовки и принимать своевременные меры на этапах отбора и допуска сотрудников к эксплуатации ПОО.

### Литература

1. Чуринов В.В. Нейроанализатор принятия решения по допуску личного состава к выполнению опасных работ с потенциально-опасными объектами / В.В. Чуринов, А.А. Ефремов // Статья в сборнике XXVI Межрегиональной НТК СВИ РВ. Инв. н. / 5709. Ч.3. 2007. С.130-136.
2. Чуринов В.В. Триггерные переменные индивидуальной выборки сотрудников, допускаемых к эксплуатации потенциально-опасных объектов / В.В. Чуринов, А.Д. Дараган // Статья в сборнике XXXVI Всероссийской научно-технической конференции ФВА РВСН им. Петра Великого «Проблемы эффективности и безопасно-

сти функционирования сложных технических и информационных систем», г. Серпухов. Ч.3. 2016. С.195-197.

3. Чуринов В.В. Методический подход сепарирования триггерных показателей качества персонала, допускаемого к эксплуатации потенциально-опасных объектов / В.В. Чуринов, А.А. Ефремов, О.В. Чуринова // Статья в сборнике «Труды МИТ 2017», АО «Корпорация Московский институт теплотехники», Москва. XVII том. Ч.1 С.191-197.

4. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104с.

5. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

6. Енюков И.С. Факторный дискриминантный и кластерный анализ: сборник работ. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.896

## СИСТЕМА ВИДЕОМОНИТОРИНГА И АНАЛИТИКИ ПАССАЖИРОПОТОКА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С РЕАЛИЗАЦИЕЙ НА PYTHON<sup>1</sup>

## VIDEO MONITORING AND PASSENGER FLOW ANALYSIS SYSTEM BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS WITH PYTHON IMPLEMENTATION

**Геннадий Петрович Суворов**

*кандидат технических наук*

**Дмитрий Вячеславович Смирнов**

*почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, доцент  
первый Вице-президент  
АНО «ИИФ»*

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

**Алексей Александрович Коробков**

*почетный работник науки и высоких технологий РФ  
кандидат технических наук, доцент  
начальник научно-методического управления  
АНО «ИИФ»  
E-mail: korobkow@iifmail.ru*

**Наталья Владимировна Аллилуева**

*специалист по сопровождению  
АНО «ИИФ»  
E-mail: os11@iifmail.ru*

### Аннотация

В статье рассмотрена актуальность внедрения автоматизированной системы мониторинга и учета пассажиров в городском общественном транспорте, обозначены проблемы детекции и анализа объектов, приведены существующие технические решения по контролю и учету пассажиров в автобусе, проанализированы виды нейронных сетей и типы фреймворков для имплементации алгоритмов и методов искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** алгоритм детекции объектов, аналитика пассажиропотока, видеомониторинг объектов на изображении, искусственный интеллект, классификация объектов на изображении, распознавание образов, сверточная нейронная сеть, система мониторинга пассажиропотока.

### Summary

The article considers the relevance of introducing an automated system for monitoring and recording passengers in urban public transport, identifies the problems of detection and analysis of objects, provides existing technical solutions for monitoring and recording passengers in a bus, analyzes the types of neural networks and types of frameworks for the implementation of algorithms and methods of artificial intelligence.

**Keywords:** object detection algorithm, passenger traffic analytics, video monitoring of objects in the image, artificial intelligence, classification of objects in the image, pattern recognition, convolutional neural network, passenger traffic monitoring system.

### Введение

Организация пассажирских перевозок является одним из важнейших направлений оказания социально значимых услуг гражданам со стороны регионов и муниципалитетов страны [1,2]. Одной из первостепенных проблем региональ-

ных, муниципальных, а также частных предприятий транспортной отрасли, оказывающих услуги по перевозке пассажиров, является проблема недополучения этими предприятиями определенной части доходов, а, соответственно, и прибыли из-за наличия т.н. «зайцев» (пассажиров,

<sup>1</sup> Публикация представлена в рамках реализации результатов, полученных при выполнении гранта Правительства Московской области в сферах науки, технологий, техники и инноваций (договор № 139/12-20 от 03.12.2020) по теме: «Система видеомониторинга и аналитики пассажиропотока на транспортных средствах с использованием методов искусственного интеллекта и сверточных нейронных сетей»

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

не оплачивающих проезд), что, в итоге, отрицательно влияет как на качество оказания услуг по перевозкам, в частности, так и на обслуживание пассажиров, в целом. В рамках концепции «умного» города с целью повышения качества управления региональным (междугородним) и муниципальным (городским, пригородным) пассажирским транспортом перед транспортниками встают задачи по организации мониторинга пассажиропотока общественного городского транспорта.

Системы автоматизированного мониторинга пассажиропотока позволяют повысить эффективность работы управления городским пассажирским транспортом в части: контроля выручки, сдаваемой персоналом; определения загруженности транспорта и оптимизации расписания движения; контроля оплаты проезда пассажирами и проч. Кроме того, возможна оптимизация персонала (кондукторов, билетеров, контролеров) вследствие передачи таких функций как: контроль входящих / выходящих пассажиров и билечивание пассажиров автоматизированным (автоматическим) системам.

Вопрос учета (контроля) числа пассажиров является актуальным вопросом не только для муниципального (городского, пригородного) транспорта, но также и для регионального (пригородных (междугородних) автобусов, электропоездов), а также метро. Данные системы мониторинга и учета пассажиропотока будут способствовать повышению качества предоставляемых услуг не только на самом транспорте (региональные и муниципальные пассажирские перевозки), но и в аэропортах, а также на железнодорожных вокзалах и станциях. Система видеомониторинга сможет, например:

- контролировать число и положение людей, находящихся в очереди в кассу (в случае с ж/д станциями, станциями метро) на паспортный (таможенный) контроль (в случае с аэропортом) – для оперативного изменения числа работающих касс, контрольно-пропускных пунктов (пунктов проверки) и проч.;

- способствовать оптимизации движения автобусов от терминала до самолета (в случае отсутствия выхода с «рукавом»);

- производить учет числа пассажиров при посадке на морские/ речные суда (для того, чтобы избежать (снизить) риски по перегрузу теплоходов, паромов).

Однако, одной из основных проблем для автоматизированного мониторинга пассажиропотока является распознавание и точность подсчета входящих/ выходящих пассажиров.

### 1. Проблемы автоматизированного мониторинга пассажиропотока

Наиболее эффективным (из проанализированных) способом получения достоверной информации о пассажиропотоках является способ, основанный на применении детекторов входа/ выхода на транспортном средстве (ТС), которые находят все более массовое применение. Тем не менее, существует проблема оперативной обработки информации, поступающей с детекторов входа/ выхода ТС.

Для распознавания входящих/ выходящих пассажиров возникает необходимость определения в автоматизированном режиме основных параметров пассажиропотока на маршрутах регионального (муниципального) транспорта. Это могут быть, например, сигналы об открытии и закрытии дверей. При этом, следует учитывать:

- тип дверей (двери в пассажирском транспорте бывают «складывающимися» (*folding*) и двери «скользящими» (*sliding*));

- погодные условия во время перевозки пассажиров;

- демографические особенности пассажиропотока (например, тот факт, что дети в возрасте до 7 лет – перевозятся бесплатно);

- рост пассажиров (взрослые, дети, лица с ограниченными возможностями (колясочники));

- скорость перемещения (при входе/ выходе) и внутри салона;

- погодные условия;

- естественное и искусственное освещение в течение суток;

- одновременный вход/ выход нескольких пассажиров и проч.

Большинство датчиков в таких условиях не способны обеспечить заданную (более 90%) достоверность работы.

В связи с вышеизложенным, автоматизированный подсчет пассажиров, как функция подсчета объектов [3], пересекающих некую границу, представляет достаточно трудоемкий процесс распознавания пассажиров, определения траекторий их движения, проведения анализа и подсчета результатов и т.д.

### 2. Технические решения для реализации автоматизированного мониторинга пассажиропотока

Для проведения автоматизированного мониторинга пассажиропотока применяются следующие системы учета.

1. *Контрольная ступенька* предполагает установку датчика на первой ступеньке автобуса. Датчик накапливает информацию о количестве перевезенных пассажиров за определенный

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

временной интервал. Заявляемая производителем погрешность измерений у таких датчиков составляет 5-7%.

Основными факторами ошибок при учете пассажиров могут быть: пассажиры, выходящие из автобуса, чтобы пропустить других пассажиров; дети, которые не должны быть учтены при бесплатном проезде; несколько пассажиров, стоящих одновременно на ступеньке перегруженного автобуса. Большинство сбоев системы учета происходит именно в час «пик».

2. *Инфракрасные датчики* устанавливаются над дверьми автобуса. Основной принцип учета – это детектирование пересечений инфракрасного луча с датчика пассажиром в процессе входа/ выхода из автобуса (рисунки 1).

Факторы, влияющие на погрешность, аналогичны таковым в системе с контрольной ступенькой.

3. *Видеонаблюдение* является наиболее точным способом подсчета пассажиров. С помощью специального программного обеспечения (СПО) анализируются данные, поступающие с видеокамер, происходит распознавание пассажиров и слежение за ними в автобусе с момента попадания их в поле зрения камеры. При этом происходит снижение погрешности учета одного и того же пассажира. Кроме того, существует возможность настройки минимального роста пассажира за счет применения видеоаналитики (ВА)<sup>2</sup>.

Динамика роста популярности ВА в последнее десятилетие (2012-2022 гг.) увеличивается по нескольким причинам:

- гибкое управление видеопотоками (при анализе их контента «на лету»);
- автоматизация аналитических функций;
- высокая степень интеграции алгоритмов ВА в различные бизнес-системы (чаще всего – видеонаблюдение, а также в других сферах безопасности) [4].

Поэтому для проведения дальнейших исследований было решено остановиться на реализации ПО ВА для обработки и автоматического анализа видеоматериала, поступающего с видеокамер.

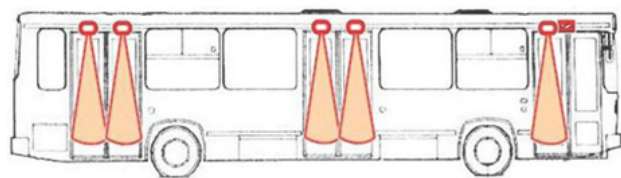


Рис. 1. Расположение ИК датчиков над дверным проемом автобуса

### 3. Цель исследований и исходные данные для разработки программы по учету пассажиропотока

Важность алгоритмов детекции и мониторинга трудно переоценить [5]. Учитывая существующую проблему с детектированием пассажиропотока, а также необходимость введения системы подсчета динамических объектов (людей), пересекающих установленную границу, целью данных исследований является разработка системы мониторинга и аналитики (подсчета) пассажиропотока на языке программирования Python.

Для распознавания пассажиров предлагается использовать нейронные сети (НС). Предлагаемый тип НС – сверточная нейронная сеть (СНС)<sup>3</sup>, представляющая собой специальную архитектуру искусственных НС, являющуюся одним из лучших алгоритмов по распознаванию и классификации изображений [6]; конфигурация СНС – YOLO<sup>4</sup> v5.

Несмотря на то, что СНС была предложена Я. Лекуном в 1988 году [7], рост популярности таких НС начался с 2012 года, когда, ежегодно возрастая, все большее число компаний стало использовать СНС для точного и достоверного распознавания изображений. Система подсчета пассажиропотока на базе НС-аналитики обеспечивает точность до 99% вне зависимости от времени года, освещенности, потока пассажиров. Данная система имеет возможность работы с IP-камерами. Благодаря возможностям искусственного интеллекта (ИИ), в виде обученной НС, существует возможность классифицировать объекты распознавания, осуществлять подсчет (учет) перевезенного багажа (в т.ч. крупногабаритного груза, велосипедов, детских колясок и проч.). Вышеуказанные вычисления производятся непосредственно на борту ТС, что сокращает потребление ресурсов, в т.ч. времени, энергии, расходов на каналы связи и проч.

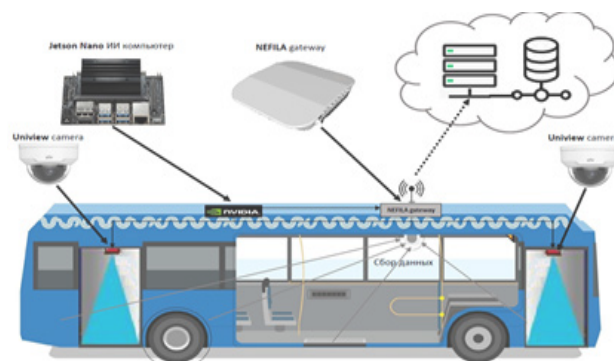


Рис. 2. Аппаратная архитектура оборудования в автобусе

<sup>2</sup> ВА – это ПО, предназначенное для работы с последовательностью изображений, поступающих с видеокамер в режиме реального времени и/ или из архивных записей. В основе ВА находится комплекс алгоритмов машинного зрения, позволяющий вести видеомониторинг и производить анализ данных без прямого участия человека.

<sup>3</sup> В англоязычной литературе – Convolutional neural network (CNN);

<sup>4</sup> YOLO – «You only look once» (пер. с англ.: «живем только раз») – алгоритм обнаружения объектов в реальном времени

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Исходными данными для проведения исследований являются записи видеопотоков с камер, установленных над дверьми автобусов общественного пассажирского транспорта.

Аппаратная архитектура оборудования в автобусе приведена на рисунке 2.

### 4. Реализация исследований

Исследования проводились в рамках работы над проектом «Система видеомониторинга и аналитики пассажиропотока на транспортных средствах с использованием методов искусственного интеллекта и сверточных нейронных сетей».

В рамках проекта были разработаны и реализованы программные средства и базы данных для хранения видеоданных, необходимых для тренировки НС (*data pipeline*), а также алгоритмы по детектированию и повышению качества мониторинга:

- алгоритм распознавания объектов от двери транспортного средства до салона (и от салона до двери);

- алгоритм обнаружения теней и «фантомных» образов;

- алгоритм «высоких» пассажиров;
- алгоритм распознавания двоянных объектов (пассажир с рюкзаком) и др.

Большая часть данных, с которыми пришлось работать в ходе выполнения проекта, относится к типам: «изображение» или «видео». Таким образом, проект можно отнести к области искусственного интеллекта (ИИ) по распознаванию цифровых изображений, их преобразованию и анализу; подообласть – «машинное зрение» [8].

### 5. Выбор конфигурации НС

Как было указано выше (см. п. 3), для работы выбрана СНС. В сравнении с полносвязной НС типа «перцептрон» преимуществами СНС являются:

- относительная устойчивость к сдвигу и повороту распознаваемого изображения;

- наличие распараллеливания вычислений, позволяющего реализовать работу и обучение СНС на графических процессорах;

- малое число настраиваемых весовых коэффициентов, вследствие использования только одного ядра таких коэффициентов для всего изображения (отсутствует необходимость применения отдельных персональных весовых коэффициентов для каждого пикселя входного изображения, что способствует обучению НС в части обобщения демонстрируемой информации (в отличие от «попиксельного» запоминания входного изображения в  $n \cdot 10^4$  весовых коэффициентов, в случае применения перцептрона));

- процесс обучения организован на базе классического метода обратного распространения ошибки.

Обычно, несколько первых уровней в сетях

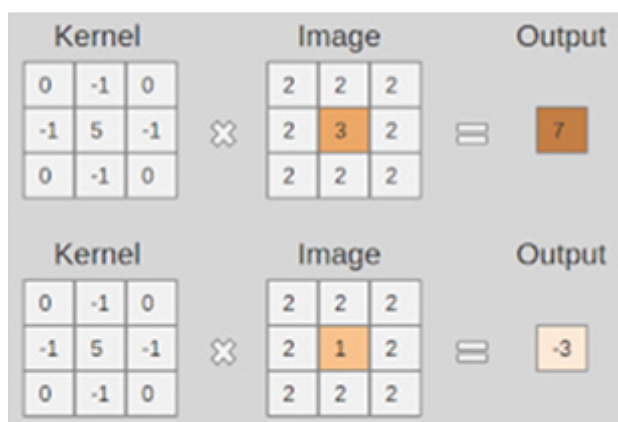


Рис. 3. Пример работы фильтров СНС

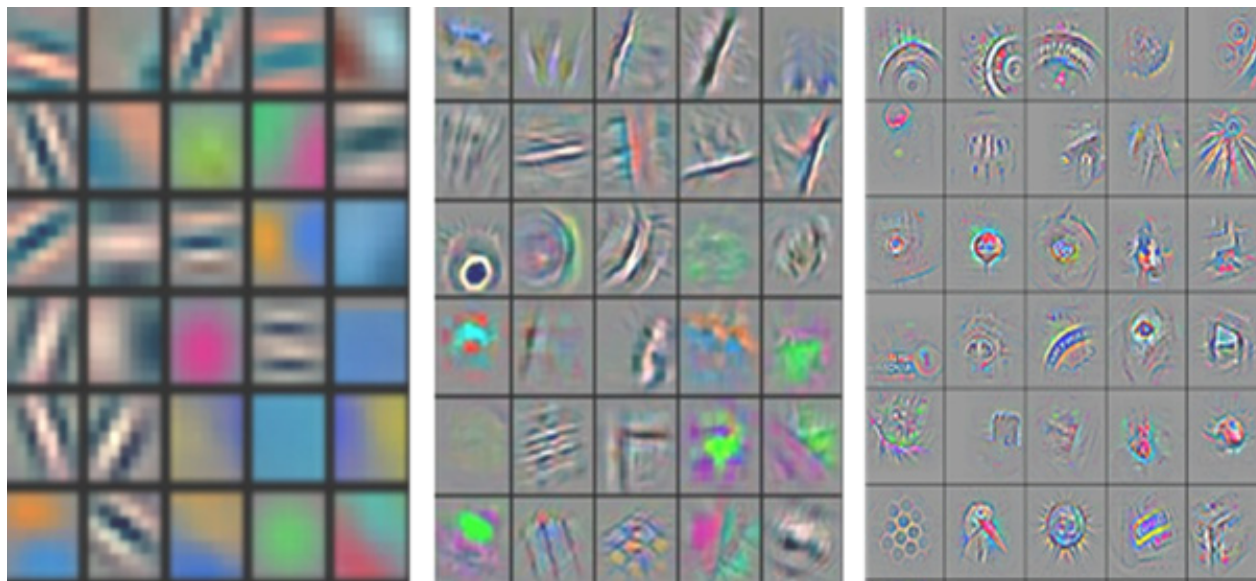


Рис. 4. Графические элементы СНС



## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

типа СНС являются специализированными (сверточными (*convolutional*)), поэтому для обработки пикселей изображений на этих уровнях используют фильтры (*filter* или *kernel*). Чаще всего фильтр отображает квадрат пикселей (3×3, 5×5, 7×7 и т.д.) предыдущего уровня СНС в один (несколько) пиксель (пикселей) следующего уровня (см. рисунок 3).

Работа фильтра СНС построена следующим образом: значения пикселей изображения векторно умножаются на значения соответствующих элементов фильтра, после этого суммируются и присваиваются окрашенному пикселю следующего уровня.

Обычная НС в процессе обучения может изменять значение весового коэффициента, привязанного к каждому нейрону, тогда как СНС в процессе обучения на начальных *convoluted*-слоях изменяет числовые значения фильтров. Т.о., обучение СНС – это, по сути, настройка значений фильтров.

Разработчик СНС, посредством применения специальных слоев (объединения и сглаживания), может, при необходимости, проводить различные операции с размерностью следующего слоя (а также с параметрами фильтров) в целях того, чтобы СНС «нашла» характерные фильтры, а также корреляции фильтров для изображений из обучающей выборки (см. рисунок 4).

После того, как на определенном слое СНС фильтры преобразуются в числа, последующие слои начинают «работать» как в обычной НС. К сети, в таком случае, могут быть применены стандартные алгоритмы и модели ИИ, используемые в задачах распознавания образов. В частности, в задачах типа «один из нескольких классов» (*multiclass classification*).

Одной из ключевых задач компьютерного зрения, а равно и обработки изображений и видеодат, является задача обнаружения объ-

ектов. Особенно важно, чтобы обнаружение происходило в реальном времени. Для этого необходимо на регулярной основе проводить сравнительный анализ показателей наиболее перспективных моделей. Ниже (см. рисунок 5) приведены результаты сравнительного анализа скорости и точности таких моделей [5].

Все модели, приведенные на *рисунке 5*, были «натренированы» на стандартном наборе изображений [5] (числовое значение столбца «mAP-50» отображает среднюю точность распознавания изображений (в %) при пороге – 50%, а числовое значение столбца «time» отображает скорость работы модели (в мс). Наиболее подходящим инструментом (с рациональной т.з.) для решения задачи обнаружения объектов является алгоритм *YOLO*.

Классическое решение задачи детекции заключается в последовательной реализации 3-х этапов:

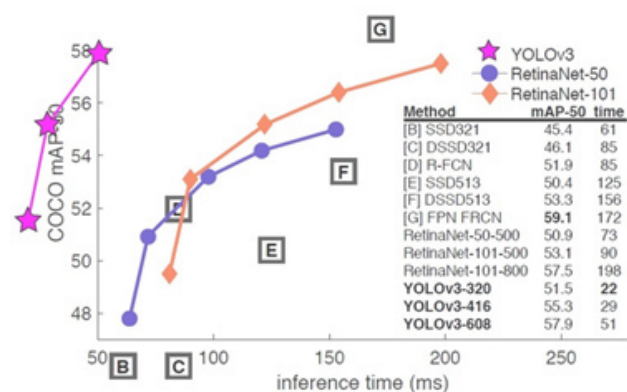
- разбиение изображения на квадратные области;
  - классификация областей на наличие объекта;
  - классификация обнаруженного объекта.
- Т.о., НС дважды «просматривает» изображение. Данный способ требует значительных затрат как времени, так и вычислительных мощностей.

Алгоритм *YOLO* использует иной принцип, последовательность которого изложена ниже:

- компрессия исходного изображения в матрицу размерностью 13×13, в каждой клетке которой записана информация о наличии и классе этого объекта на соответствующей части изображения, т.о., *YOLO* «просматривает» изображение один раз, что существенно увеличивает скорость обработки информации;
- разбиение изображения на набор ячеек сетки, т.о, чтобы каждая ячейка сетки в алгоритме *YOLO* имела связанный вектор на выходе, который информирует о:
  - ◆ наличии либо отсутствия объекта в конкретной ячейке сетки;
  - ◆ классе наличествующего объекта;
  - ◆ предполагаемой ограничивающей рамки объекта (местоположение);
- разделение изображения на сеточную систему, где каждая сетка обнаруживает объекты внутри себя.

Данный алгоритм может использоваться для обнаружения объектов в реальном времени на основе потоков данных. Одним из достоинств алгоритма *YOLO* – требование малых вычислительных ресурсов.

В реализуемом проекте были использованы изображения матрицы 576×704 пикселей.



**Рис. 5.** Сравнение показателей моделей (ось x – время распознавания одного кадра [чем выше, тем хуже]; ось y – усредненная точность [чем выше, тем лучше])

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

При применении обычных НС, число входных нейронов будет составлять  $n=405504$  только на первом слое. С учетом последующих (скрытых) слоев количество параметров НС многократно возрастает. Для того, чтобы можно было решать задачи машинного зрения без применения суперкомпьютеров, НС пришлось бы без необходимости уменьшать и упрощать, что отрицательно скажется на получаемом результате, вследствие того, что это часто идет в разрез с требованиями к точности получения и аккуратности результатов применения НС.

В качестве базовой архитектуры НС была выбрана конфигурация алгоритма *YOLO* в версии

№ 5 (*v5*), которая способна обеспечить высокие точность и скорость распознавания. Общая архитектура НС *YOLO v5* по слоям представлена на рисунке 6.

### 6. Выбор фреймворка для реализации проекта

Для тестирования производительности фреймворка<sup>5</sup> на языке *Python* была реализована НС в операционной системе *Windows*.

В целях работы с машинным обучением есть несколько известных ИИ-фреймворков: *Tensorflow*, *PyTorch*, *Keras*, *Darknet* и *XGBoost*. У каждого из указанных фреймворков есть свои преимущества и недостатки, которые приведены в таблице 1.

**Таблица 1**  
Достоинства и недостатки ИИ-фреймворков

Фреймворк	Достоинства	Недостатки
<i>TensorFlow</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ ориентирован для создания НС на этапе «продакшн»<sup>6</sup>;</li> <li>◆ самостоятельно оптимизирует ресурсы для вычислений;</li> <li>◆ значительное число пользователей («комьюнити»);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ сложен в использовании и освоении;</li> <li>◆ «недружелюбный»;</li> <li>◆ существует необходимость постоянного контроля используемой видеопамати;</li> <li>◆ стандарты фреймворка отличаются от других;</li> <li>◆ неудобная, малосодержательная документация;</li> </ul>
<i>PyTorch</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ имеет множество встроенных модулей, которыми достаточно легко комбинировать;</li> <li>◆ оптимален для реализации индивидуальных типов слоев НС и работы на внешнем графическом процессоре (<i>GPU</i>);</li> <li>◆ существует возможность самостоятельного написания тренировочного кода;</li> <li>◆ обладает широким выбором моделей, предварительно прошедших обучение;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ неудобная, малосодержательная документация, отсутствие документации на некоторые функции и методы;</li> </ul>
<i>Keras</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ удобен в использовании;</li> <li>◆ легок в освоении;</li> <li>◆ оперативно развивается;</li> <li>◆ удобная в использовании содержательная документация;</li> <li>◆ встроен в <i>Tensor Flow</i>;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ узкоспециализированный (не оптимален для больших проектов);</li> </ul>
<i>Darknet</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ простой;</li> <li>◆ высокопроизводительный;</li> <li>◆ удобный в использовании;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ узкоспециализированный (в основном ориентирован на решение задач с обнаружением);</li> <li>◆ не оптимален для больших проектов;</li> <li>◆ неудобная, малосодержательная документация;</li> </ul>
<i>XGBoost</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ точный;</li> <li>◆ достаточно оперативный и удобный инструмент для тренировки моделей типа «дерево решений»;</li> <li>◆ оптимально подходит для проверки гипотез.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ узкоспециализированный.</li> </ul>

<sup>5</sup> Фреймворк – это набор инструментов и стандартных реализаций для обеспечения более быстрой разработки какого-либо программного продукта.

<sup>6</sup> «Продакшн» – это фаза проекта, в ходе которой происходит создание продукта и подготовка его к распространению (передаче заказчику).

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

*TensorFlow* [9] ориентирован на такие проекты, которые предусматривают в ходе своей реализации создание многослойных СНС; достаточно универсален, так как может быть использован для распознавания: изображений, лиц, речи, объектов, в т.ч. для распознавания текста.

*PyTorch* ориентирован на проекты, при реализации которых присутствует необходимость обучать модели достаточно быстро и эффективно; наиболее всего подходит для проектов, в которых требуется выполнить оперативное прототипирование при реализации стадии «R&D» проекта, а также для непрофессионалов и небольших проектов.

*Keras* ориентирован на проекты, в которых требуется выполнить оперативное прототипирование, а также на проекты, связанные с переводом, распознаванием речи и изображений.

*Darknet* ориентирован, прежде всего на небольшие проекты, неплохо зарекомендовал себя при решении задач обнаружения.

*XGBoost* используется для решения задач классификации, упорядочивания, регрессии, а также задач на предсказание.

Основными ведущими индустриальными фреймворками являются 2 фреймворка: *PyTorch* и *TensorFlow*. Оба указанных фреймворка «работают» с тензорами<sup>7</sup>.

В целом, по всем показателям (как по скорости, так и по производительности) *TensorFlow* и *PyTorch* практически одинаковы. Основным показателем при выборе фреймворка оказался стиль работы с ним. К примеру, *TensorFlow* более всего похож на «черный ящик», которому поступают для исполнения команды. Но в проекте создания ИИ необходимо часто и много дописывать свои алгоритмы и методы на языке *Python*, поэтому выбор пал в пользу *PyTorch*. Таким образом

разом для имплементации алгоритмов и методов ИИ определен фреймворк *PyTorch*.

Для решения задач идентификации объектов на изображении и операций с базой данных использовались бесплатные библиотеки на языке *Python* (*numpy*, *sklearn*, *pandas*, *scikit-learn*, *scikit-image*, *XGBoostClassifier* и др.).

### Заключение

Практическая реализация программы СНС на фреймворке *PyTorch/ Python* для детекции и распознавания объектов может быть применена для систем мониторинга и аналитики пассажиропотока на общественных транспортных средствах муниципального хозяйства. Особую роль система может сыграть в проблеме борьбы с нелегальным оборотом наличных средств и воровства при оплате проезда.

Реализация программы<sup>8</sup> по детекции и распознаванию объектов для системы мониторинга и учета лиц, пересекающих указанную границу, может предоставлять достаточно ценные данные для оперативного принятия бизнес-решений, в таких сферах народного хозяйства, как:

- *торговля*: информация о числе посетителей магазинов, торгово-развлекательных (ТРЦ) (торговых (ТЦ) ) центров, а также отдельных зон как магазинов, так и ТРЦ (ТЦ);
- *банковская сфера*: получение информации о числе посетителей отделений (офисов);
- *гостиничный и туристический бизнес*: получение информации о числе посетителей ресторанов, кинотеатров, турагентств и проч.;
- *транспорт*: оценка параметров движения пассажиропотоков в системах «умного» города, оценить загруженность маршрутов общественного транспорта, улучшить собираемость платы за проезд (уменьшения незаконного оборота «черной наличности».

Практическая реализация программы для систем мониторинга и анализа пассажиропотока на основе методов искусственного интеллекта и СНС сетей будет рассмотрена на следующем этапе рассматриваемого проекта.

### Литература

1. Роль и значение городского пассажирского транспорта в экономике региона. URL: // <https://articlekz.com/article/8795> (дата обращения: 01.06.2022).

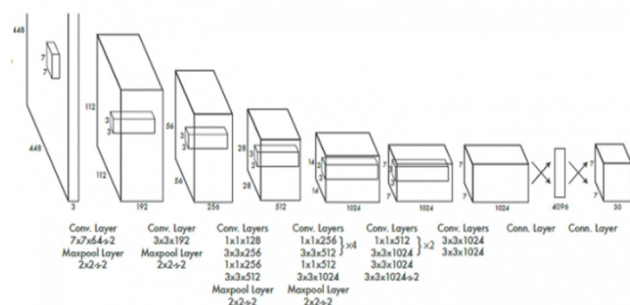


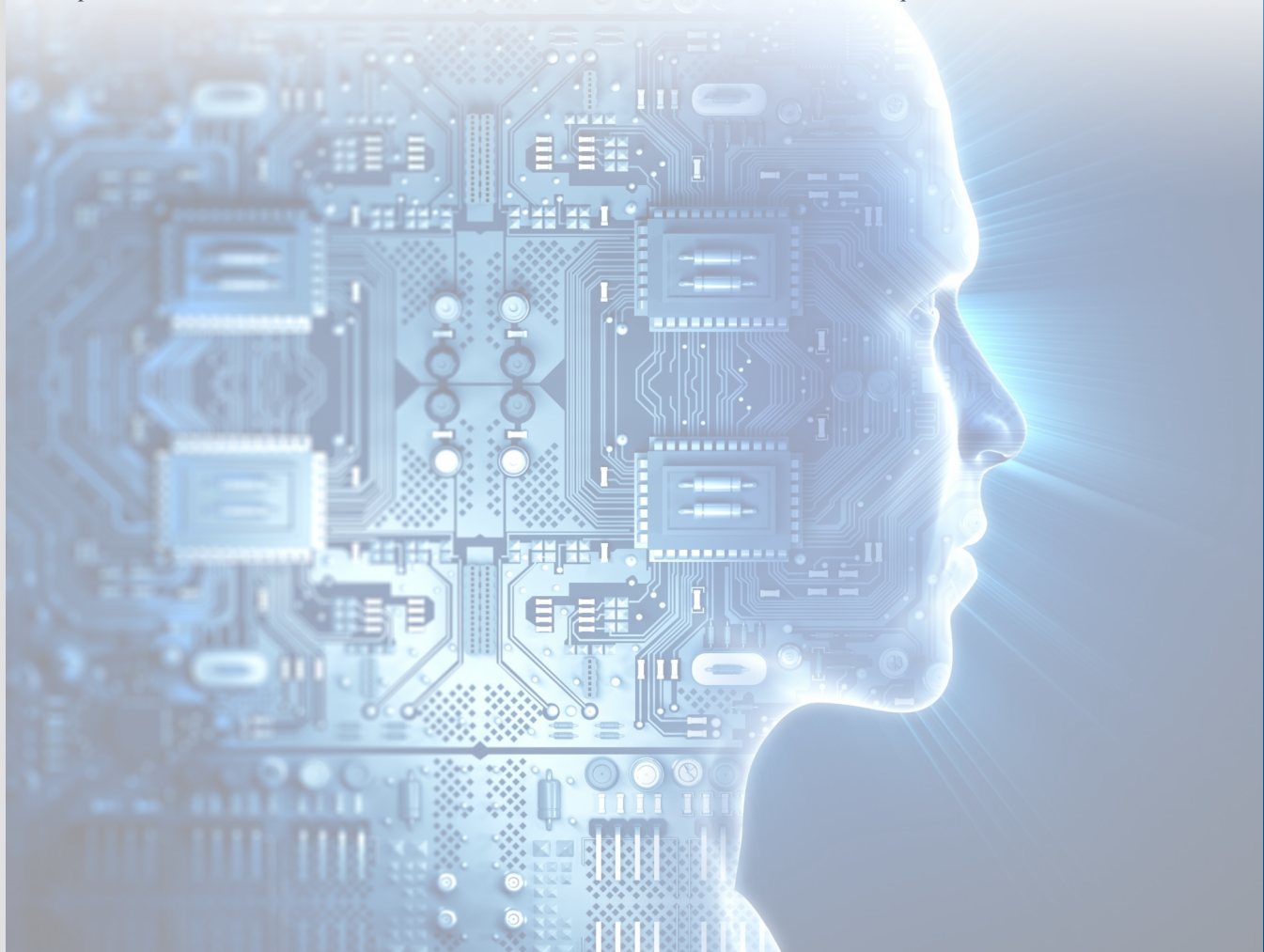
Рис. 6. Архитектура СНС по модели YOLO v5

<sup>7</sup> Тензор – это многомерная матрица, оптимальный объект для производства высокоскоростных вычислений. Тензор можно параллельно рассчитывать на «ядрах» (kernels GPU) – на GPU видеокарт (а не GPU компьютера).

<sup>8</sup> В соответствии с целевыми показателями результативности проекта: «Система видеомониторинга и аналитики пассажиропотока на транспортных средствах с использованием методов искусственного интеллекта и сверточных нейронных сетей» (договор № 139/12-20 от 03.12.2020) Институтом инженерной физики 17.09.2021 была подана заявка на регистрацию программы для ЭВМ «Программа детекции, мониторинга и подсчета пассажиров общественного транспорта с помощью нейронной сети». 29.09.2021 на указанную программу получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2021665578.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

2. Значение пассажирских перевозок. URL: <http://reisvoer.com/news/124-passenger-transportation> (дата обращения: 01.06.2022).
3. Fritz Labs Inc. Object Detection Guide (Руководство по обнаружению объектов). URL: <https://www.fritz.ai/object-detection> (дата обращения: 01.06.2022).
4. KDnuggets. Object Detection: An Overview in the Age of Deep Learning, (Обнаружение объектов: Обзор в эпоху глубокого обучения). URL: <https://www.kdnuggets.com/2017/09/object-detection-overview-deep-learning.html> (дата обращения: 01.06.2022).
5. Valkov V. Object Detection on Custom Dataset with YOLO (v5) using PyTorch and Python (Вальков В. Обнаружение объектов в пользовательском наборе данных с помощью YOLO (v5) с использованием PyTorch и Python), 2021. URL: <https://curiously.com/posts/object-detection-on-custom-dataset-with-yolo-v5-using-pytorch-and-python> (дата обращения: 01.06.2022).
6. Kumar V. Convolutional Neural Networks. Basic fundamentals of CNN (В. Кумар. Сверточные нейронные сети. Основы CNN). URL: <https://towardsdatascience.com/convolutional-neural-networks-f62dd896a856> (дата обращения: 01.06.2022).
7. Y. LeCun, B. Boser, J.S. Denker, D. Henderson, R.E. Howard, W. Hubbard, L.D. Jackel: Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition, Neural Computation, 1(4): 541-551, Winter 1989 (Ю. Лекун, Б. Бозер, Дж.С. Денкер, Д. Хендерсон, Р. Э. Ховард, У. Хаббард и Л.Д. Джекл: Обратное распространение, применяемое к распознаванию рукописных почтовых индексов, Нейронные вычисления, 1 (4): 541-551, Зима 1989).
8. Leban J. Image recognition with Machine Learning on Python. Image processing (Лебан Дж. Распознавание изображений с помощью машинного обучения на Python. Обработка изображений). URL: <https://towardsdatascience.com/image-recognition-with-machine-learning-on-python-image-processing-3abe6b158e9a> (дата обращения: 01.06.2022).
9. Johns R. PyTorch vs TensorFlow for Your Python Deep Learning Project (Джонс Р. PyTorch или TensorFlow для Вашего проекта глубокого обучения Python). URL: <https://realpython.com/pytorch-vs-tensorflow> (дата обращения: 01.06.2022).



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.3

## КИНЕМАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

## KINEMATIC AND DYNAMIC MODELS OF THE AUTOMATIC MOTION CONTROL SYSTEM FOR A ROBOTIC COMPLEX

**Елена Юрьевна Пушкарёва**

*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 (915) 192-74-39

E-mail: calgon100@yandex.ru

**Игорь Викторович Пискулин**

*преподаватель кафедры*

филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)

Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,

ул. Бригадная, д. 17

Тел.: 8 (925) 725-06-36

E-mail: pikselzte@gmail.com

### Аннотация

Представлены кинематические и динамические модели систем автоматического управления углом курса и скоростью движения робототехнических комплексов военного назначения (РТК ВН). Указанные модели могут быть использованы для определения показателей качества систем автоматического управления движением РТК.

**Ключевые слова:** передаточная функция, робототехнические комплексы военного назначения, система автоматического управления, параметры управления движением робота, угол курса робота, постоянные времени, коэффициенты усиления, математическая модель.

### Summary

Kinematic and dynamic models of systems for automatic control of the heading angle and speed of movement of military robotic complexes (RTK VN) are presented. These models can be used to determine the quality indicators of RTK automatic motion control systems.

**Keywords:** transfer function, military robotic systems, automatic control system, robot motion control parameters, robot heading angle, time constants, gain factors, mathematical model.

### Введение

В современных условиях робототехнические комплексы (РТК) становятся востребованными в различных областях техники и науки [1,2], в частности, охранная деятельность объектов различного назначения, а также использование роботов в сферах деятельности, связанных с опасностью для здоровья человека [3]. При обосновании и определении показателей качества систем автоматического управления (САУ) необходимо движение робота разделять на угловое (управление курсом) и поступательное (управление линейной скоростью движения центра масс робота), как это показано в [2,3].

Для решения задачи определения показателей качества САУ углом курса и скоростью движения необходимо знание математических моделей указанных систем. При их обосновании

примем за основу принцип управления углом курса РТК по разности скоростей [3], что позволяет составить структурную схему управления на основе двух одинаковых электроприводов, обеспечивающих необходимую разность угловых скоростей вращения двух гусениц (лент) РТК.

### Цель статьи

Обоснование кинематической и динамической моделей систем автоматического управления движением РТК для использования их при определении показателей качества системы управления движением.

### Обобщенная математическая модель САУ движением РТК

Математическая модель (ММ) должна вклю-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

часть в себя модель САУ углом курса и модель САУ управления скоростью движения. Предлагаемая динамическая модель должна также учитывать влияние управления на объект управления (шасси РТК). Выходом данной модели являются управляемые параметры (угол курса  $\psi$  и скорость движения  $V$ ). Помимо указанной динамической модели необходима и кинематическая модель, связывающая управляемые параметры ( $\psi, V$ ) с координатами линейного движения центра масс ( $X, Z$ ).

На основании вышеизложенного на *рисунке 1* представлена обобщенная структурная схема САУ движением РТК.

Из *рисунка 1* видно, что динамическая модель представлена системами автоматического управления углом курса РТК и скоростью его движения. Остальные элементы системы относятся к кинематической модели (блоки тригонометрических функций  $\cos, \sin$ , два блока умножения и два блока интеграторов; остальные четыре блока – сумматоры). Кроме того,  $X_0, Z_0$  – начальные координаты движения центра масс РТК, а  $V_{0x}, V_{0z}$  – их начальные скорости. Выходом САУ углом

неточного воспроизведения параметров  $\psi_{зад}$  и  $V_{зад}$  объект управления (РТК) пришел в точку В вместо точки А. Выясним влияние этих управляемых параметров на конечную ошибку наведения  $dl$ , показанную на *рисунке 2*.

С этой целью найдем полные дифференциалы по координатам  $X, Z$  (т.е.  $dX_k, dZ_k$ ).

Используя (1), имеем:

$$dX_k = \frac{\partial X_k}{\partial V} dV + \frac{\partial X_k}{\partial \psi_{uw}} d\psi_{uw} = t_k (\cos \psi_{uw} dV - V \sin \psi_{uw} d\psi_{uw}), \quad (2)$$

$$dZ_k = \frac{\partial Z_k}{\partial V} dV + \frac{\partial Z_k}{\partial \psi_{uw}} d\psi_{uw} = t_k (\sin \psi_{uw} dV + V \cos \psi_{uw} d\psi_{uw}). \quad (3)$$

Тогда дифференциал от расстояния между точками А и В определяется следующим образом:

$$dl = \sqrt{(dX_k)^2 + (dZ_k)^2}. \quad (4)$$

Заменяя в (4) дифференциалы  $dX_k$ , и  $dZ_k$  их правыми частями из (2) и (3), и производя преобразования, получим:

$$dl = t_k \sqrt{(dV)^2 + V^2 (d\psi_{uw})^2}. \quad (5)$$

Следует заметить, что выражение (5) дифференциал  $dV$  является ошибкой воспроизведения скорости  $\varepsilon_v$ , а дифференциал  $d\psi_{uw}$  – ошибкой воспроизведения угла курса  $\varepsilon_\psi$ , т.е.

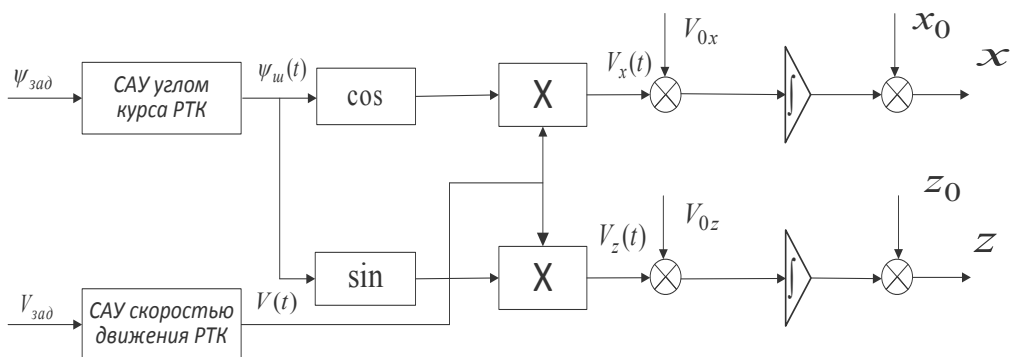


Рис. 1. Обобщенная структурная схема САУ движением РТК

курса является углом курса шасси робота  $\psi_{uw}(t)$ , а выходом САУ скоростью движения – линейная скорость  $V(t)$ , которая должна соответствовать заданной скорости  $V_{зад}$ .

Связь координат ( $X, Z$ ) с параметрами управления ( $\psi_{uw}, V$ ) иллюстрируются на *рисунке 2*.

Из *рисунка 2* видно, что конечные координаты  $X_k$  и  $Z_k$  определяются следующими выражениями:

$$X_k = V t_k \cos \psi_{uw}, \quad Z_k = V t_k \sin \psi_{uw}. \quad (1)$$

где  $t_k$  – конечное время (время движения РТК до точки А).

Будем считать, что заданной точкой прихода РТК является точка А. Однако по причинам

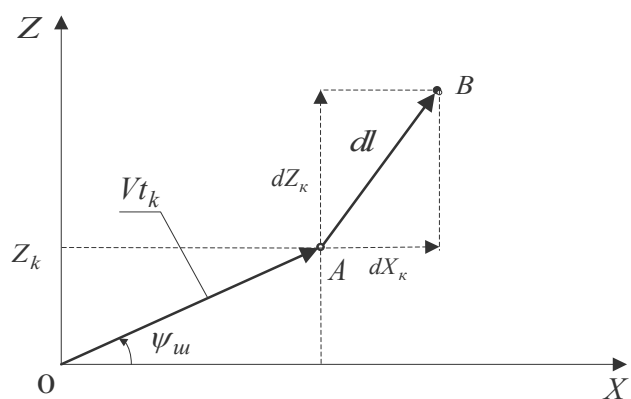


Рис. 2. Связь линейных координат ( $X, Z$ ) РТК с параметрами управления ( $\psi_{uw}, V$ )

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$$dV \equiv \varepsilon_v, \quad d\psi_{ш} \equiv \varepsilon_k. \quad (6)$$

Поэтому, повышая точность САУ по углу курса ( $\varepsilon_k$ ) и по скорости ( $\varepsilon_v$ ) можно влиять на точность наведения РТК, т.е. стремиться уменьшать величину дифференциала  $dl$ .

### Динамические модели САУ углом курса РТК и скоростью движения

Будем исходить из того, что при управлении углом курса по разности скоростей используются два электропривода (по одному на гусеницу). Для создания указанной разности скоростей необходимо в каком-либо из каналов управления гусеницей (лентой) иметь усилительное звено с коэффициентом усиления  $a$  (при  $a > 1$  – управление путем увеличения скорости, при  $a < 1$  – управление путем уменьшения скорости).

Если полагать, что передаточные функции электроприводов одинаковые, т.е.

$$W_{эл1}(P) = W_{эл2}(P),$$

то при параллельном согласном соединении двух приводов передаточная функция данного соединения примет следующий вид:

$$W_{эл}(P) = \alpha W_{эл1}(P) - W_{эл2}(P) = (\alpha - 1)W_{эл1}(P), \quad (7)$$

при  $a > 1$ .

Для поворота шасси в противоположную сторону путем уменьшения скорости (при  $a < 1$ ) необходимо выражение (7) изменить с учетом того, что на выходе второго электропривода будет большая скорость, чем на выходе первого:

$$W_{эл}(P) = W_{эл2}(P) - \alpha W_{эл1}(P) = (1 - \alpha)W_{эл1}(P), \quad (8)$$

при  $a < 1$ .

Из выражения (7) видно, что при управлении путем повышения скорости ( $a > 1$ ) в электроприводе появляется множитель  $(a-1)$ , а при управлении путем понижения скорости, согласно выражению (8), появляется множитель  $(1-a)$ . Это приводит к зависимости устойчивости от коэффициента  $a$ .

Для того, чтобы этого не допустить, целесообразно в передаточной функции регулятора САУ управления углом курса иметь усилительное звено с переменным коэффициентом усиления  $K$ , зависящим от коэффициента  $a$ , т.е.

$$K(a) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha - 1}, & \text{если } a > 1, \\ \frac{1}{1 - \alpha}, & \text{если } a < 1. \end{cases} \quad (9)$$

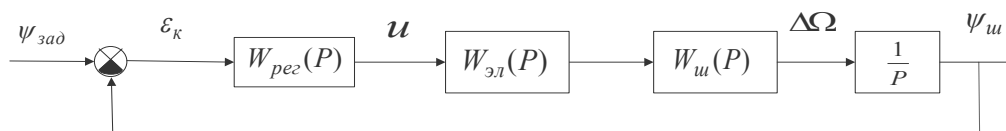


Рис. 3. Структурная схема замкнутой одноканальной САУ углом курса, эквивалентная двухканальной системе

Умножение правых частей выражений (7) и (8) на коэффициент  $K(a)$  приводит к взаимному сокращению множителей  $(a-1)$  и  $(1-a)$  в выражениях (7) и (8) соответственно.

В результате этих преобразований будет иметь место замкнутая одноканальная САУ, эквивалентная замкнутой двухканальной САУ, в каждом из каналов которой имеется свой электропривод.

Соответствующая структурная схема замкнутой одноканальной САУ, эквивалентной двухканальной системе, приведена на рисунке 3.

На рисунке 3 обозначены:

$\varepsilon_k$  – ошибка воспроизведения угла курса;

$u$  – управление;

$W_{ш}(P)$  – передаточная функция шасси РТК;

$\Delta\Omega$  – разность скоростей (интегрирование которой звеном  $\frac{1}{P}$  приводит к появлению угловой величины  $\psi_{ш}$ ).

Как показано в [2], при оценке показателей качества САУ углом курса РТК достаточно ограничиться постоянным входным воздействием ( $\psi_{зад} = \psi_0$ ) или же линейным воздействием ( $\psi_{зад} = \Omega t$ ).

Также в соответствии с [4] примем следующие структуры передаточных функций:

$$W_{рег}(P) = K_{рег}, \quad W_{эл}(P) = \frac{K_3 K_\delta}{(1 + T_3 P)(1 + T_\delta P)},$$

$$W_{ш}(P) = \frac{K_{ш}}{1 + T_{ш} P}, \quad (10)$$

где  $K_{рег}$ ,  $K_3$ ,  $K_\delta$  и  $K_{ш}$  – коэффициенты усиления регулятора, электромашинного усилителя, двигателя и шасси соответственно;

$T_3$ ,  $T_\delta$ ,  $T_{ш}$  – постоянные времени указанных элементов соответственно.

При этом передаточная функция по ошибке имеет вид:

$$W_\varepsilon(P) = \frac{P(1 + T_3 P)(1 + T_\delta P)(1 + T_{ш} P)}{P(1 + T_3 P)(1 + T_\delta P)(1 + T_{ш} P) + K_v}, \quad (11)$$

где  $K_v = K_{рег} K_3 K_\delta K_{ш}$  – коэффициент усиления САУ по скорости (при отработке угла курса  $\psi_{зад}$ ).

Рассмотрим математическую модель САУ скоростью движения РТК, входящую в динамическую модель.

Указанная модель получается из модели рисунка 3, если произвести замену интегрирующего звена на усилительное звено с коэффициентом преобразования (угловой скорости  $\Omega$  в линейную скорость движения  $V$ ) в виде  $K_{ш}$ . Ввиду того, что в данной САУ нет необходимости в

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

управлении разностью угловых скоростей  $\Delta\Omega$  (т.е. коэффициент  $a=1$ ), на выходе блока шасси с передаточной функцией  $W_{ш}(P)$  вместо  $\Delta\Omega$  будет угловая скорость  $\Omega$ , получаемая за счет функционирования обеих приводов.

Кроме того, при движении по неровной местности РТК будет подвержен влиянию этих неровностей на линейную скорость  $V$ , что должно быть отображено влиянием возмущения  $\zeta$  на указанную скорость. Соответствующая схема приведена на рисунке 4.

Используя выражение (10), получим следующую передаточную функцию по ошибке для схемы (рисунк 4). Тогда имеем

$$W_{\varepsilon}(P) = \frac{(1+T_{\Sigma}P)(1+T_{\Delta}P)(1+T_{ш}P)}{(1+T_{\Sigma}P)(1+T_{\Delta}P)(1+T_{ш}P) + K_v}, \quad (12)$$

где  $K_v = K_{рег}K_{\Sigma}K_{\Delta}K_{ш}K_{пр}$  – коэффициент усиления САУ по скорости (при обработке заданной скорости).

Следует заметить, что рассмотренный здесь регулятор не имеет в своем составе таких параметров, как заданное конечное время управления, начальные и конечные параметры управляемой скорости и угла курса.

В этом случае данный регулятор не является терминальным, а поэтому перевод объекта управления (РТК) не будет сопровождаться высоким показателем качества в конечной точке управления.

Преимуществом терминального управления, по сравнению с управлением по отклонению, является также и то, что терминальный закон управления позволяет реализовать не только заданные конечные координаты, а также их конечные скорости.

### Заключение

На основании вышеприведенных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Динамическая модель системы управления движением робота включает в себя блоки автоматического управления углом курса и линейной скоростью движения центра масс; при этом кинематическая модель связывает параметры управления (курс и скорость) с линейными координатами движения центр масс РТК (два интегратора, два блока умножения и сумматора).

2. Для получения заданного показателя качества воспроизведения углов курса и линейных скоростей движения центра масс устройство управления автоматической системы должно включать в себя интегрирующий контур, обеспечивающий повышение астатизма на единицу, что приводит к повышению точности системы.

3. При переводе шасси робота по углу курса из начального состояния в заданное конечное состояние следящая система должна быть заменена на терминальную.

### Литература

1. Корсунский В.А. Перспективы развития военных мобильных робототехнических комплексов наземного базирования в России / В.А. Корсунский, В.Н. Наумов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. №10. С.29.
2. Пушкарёв Ю.А. Задачи слежения и терминального управления в ракетно-космической технике / Ю.А. Пушкарёв, Е.Ю. Пушкарёва. Монография. Серпухов: Филиал ВА РВСН им. Петра Великого, 2020. 375 с.
3. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. Modern Control Systems, Fourth Edition. ADDISON – WESLEY, 1998. 800 p.
4. Пушкарёв Ю.А. Теория автоматического управления. Учебник / Ю.А.Пушкарёв, Е.Ю.Пушкарёва. Серпухов: МО РФ, 2020. Ч.1. 333 с. Ч.2. 258 с.

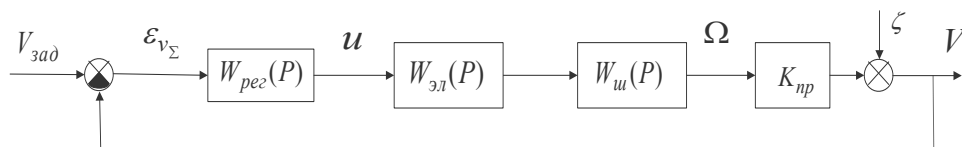


Рис. 4. Структурная схема замкнутой САУ скоростного движения РТК





# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004

## МЕТОДИКА НЕПРЕРЫВНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ОПЕРАТОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕГО ДЕЙСТВИЙ С МАНИПУЛЯТОРОМ ТИПА «МЫШЬ»

## THE METHODS AND ALGORITHMS OF CONTINUOUS AUTHENTICATION OF THE OPERATOR BASED ON THE ANALYSIS OF HIS ACTIONS WITH A MOUSE- TYPE MANIPULATOR

**Олег Игоревич Атакищев**

почетный работник науки и высоких технологий РФ  
доктор технических наук, профессор  
заместитель генерального директора  
по специальным проектам  
АНО «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93  
E-mail: aoi007@mail.ru

**Андрей Петрович Лабазников**  
военнослужащий

**Вадим Геннадьевич Грибунин**

почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, доцент  
главный научный сотрудник  
АНО «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

**Виталий Евгеньевич Ананьев**

начальник отдела  
АНО «ИИФ»  
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов,  
Большой Ударный пер., д. 1а  
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

### Аннотация

В статье разработана методика непрерывной аутентификации оператора информационной системы на основе анализа его действий с манипулятором типа «мышь». Предложена формализация сбора низкоуровневых первичных признаков на основе автомата Мили, ряд алгоритмов обработки признаков движения мыши, выполнено компьютерное моделирование методики, которое показало эффективность предложенных решений.

**Ключевые слова:** аутентификация, машинное обучение, автомат Мили, теория информации.

### Summary

The article develops a method of continuous authentication of an information system operator based on the analysis of his actions with a mouse-type manipulator. A formalization of the collection of low-level primary features based on the Mile automaton, a number of algorithms for processing mouse movement signs, computer modeling of the technique, which showed the effectiveness of the proposed solutions, is proposed.

**Keywords:** authentication, machine learning, automatic Miles, information theory.

### Аутентификация и биометрическая аутентификация

Идентификация и последующая аутентификация операторов информационных систем является важными механизмами информационной безопасности. Однако, несмотря на то, что необходимость применения этих механизмов была общеизвестна, требований к ним не предъявлялось. Положение изменилось с введением в действие ГОСТ Р ИСО/ МЭК 15408 [1]. В том числе, в нем была упомянута и биометрическая аутентификация.

1 мая 2020 года введен в действие националь-

ный стандарт, посвященный идентификации и аутентификации в автоматизированных системах [2]. В этом стандарте даны определения соответствующим терминам, отмечено, что в общем случае идентификация и аутентификация охватывают:

- первичную идентификацию;
- хранение и поддержание актуального состояния (обновление) идентификационной и аутентификационной информации;
- вторичную идентификацию;
- аутентификацию, включающую проверку подлинности субъекта (объекта) доступа и при-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

надлежасти ему предъявленных идентификатора и аутентификационной информации.

В стандарте [2] указано, что он не исключает применение биометрических методов при идентификации и аутентификации, но и не устанавливает требования по их реализации. Дано определение биометрического фактора: это определенный признак (характеристика) субъекта доступа, информация о котором (которой) используется при аутентификации.

Биометрическим методам аутентификации посвящен ряд национальных стандартов, как оригинальных, разработанных под руководством д.т.н. А.И. Иванова [3-6], так и документов, созданных на основе международных стандартов [7-10].

В стандарте [3] приведено определение биометрического образа: «Образ человека, полученный с выходов первичных измерительных преобразователей физических величин, подвергающийся далее масштабированию и иной первичной обработке с целью извлечения из него контролируемых биометрических параметров человека». В рамках настоящей работы, биометрический образ – это текущие координаты мыши, а также признаки нажатия / отжатия клавиш.

Под высоконадежной биометрической аутентификацией в [3] понимается биометрическая аутентификация с приемлемой вероятностью ошибок первого рода (отказу «своему») и гарантированно малой вероятностью ошибок второго рода (пропуск «чужого»), сопоставимой по своему значению с вероятностью случайного подбора кода неизвестного криптографического ключа при малом числе попыток подбора.

Это определение вызывает определенное недоумение. В самом деле, пусть длина криптографического ключа составляет 256 бит. Тогда, например, при числе попыток подбора, рав-

ном 1000, вероятность случайного подбора, а значит и вероятность ошибки второго рода составит примерно  $10^{-75}$ . Очевидно, что это слишком строгие требования к механизму аутентификации (например, эквивалентная длина буквенно-цифрового пароля в этом случае составила бы более 40 символов). Все дело в том, что в этом документе рассматриваются механизмы аутентификации, основанные на преобразовании «биометрия-код», где биометрический образ представляет собой доступные для восприятия (понимания) человеком физические величины. Примерами могут являться сетчатка глаза, отпечаток пальца. Для таких образов можно предложить преобразование в код, основанное на робастном хэшировании. Однако, для рассматриваемого в настоящей работе принципа аутентификации по признакам работы оператора с мышью такой подход не применим.

Необходимо отметить, что методы аутентификации по почерку работы оператора с мышью не упомянуты ни в одном известном авторам стандарте.

### Общее описание методики

Возрастание угроз безопасности информации, с одной стороны, и увеличение популярности машинного обучения, с другой стороны, породили многочисленные исследования по применению технологий машинного обучения в целях обеспечения информационной безопасности [11].

Одним из перспективных направлений представляется реализация непрерывной аутентификации оператора по его взаимодействию с манипулятором типа «мышь» (далее для краткости будем называть его мышью). В работе [12] было описано, какие угрозы безопасности информации при этом парируются, а также приведена модель вышеупомянутого взаимодействия.

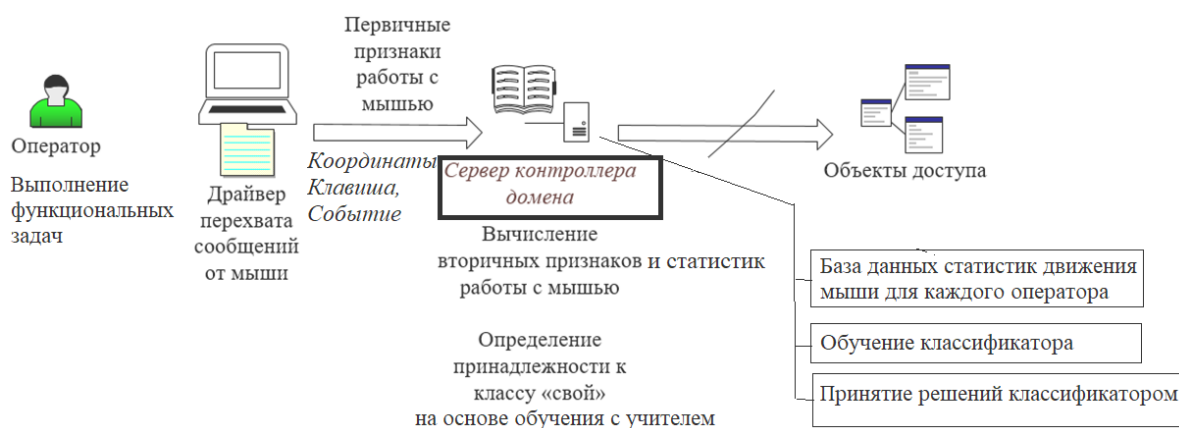


Рис. 1. Общая архитектура подсистемы непрерывной аутентификации по действиям оператора с мышью

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

На *рисунке 1* приведена общая архитектура подсистемы непрерывной аутентификации по действиям оператора с мышью. Программный драйвер, установленный на компьютере пользователя и выступающий в качестве агента, фиксирует текущие координаты мыши и признаки нажатия клавиш и передает эту информацию на сервер. На сервере выполняется обработка этих первичных признаков, и статистики полученных вторичных признаков сравниваются с ранее зарегистрированными. Это сравнение осуществляется в результате решения задачи классификации, которая решается методами машинного обучения с учителем

В настоящей работе, на основе разработанной нами в [12] модели работы оператора с мышью, предложена методика непрерывной аутен-

тификации оператора при его взаимодействии с мышью (далее – методика). Данная методика включает в себя следующие, отличающиеся от известных, шаги:

- алгоритм сбора первичных низкоуровневых данных, очистки их от случайных выбросов, ошибок;
- алгоритмы агрегации признаков, повышения их абстрактности и вычисления статистик (в соответствии с моделью [12]);
- алгоритм уменьшения размерности пространства признаков.

Кроме того, выполнен выбор показателей эффективности, классификаторов для решения задачи, объемов обучающего, проверочного и тестового множеств, изучены зависимости показателей эффективности от различных параметров.

### Этап разработки системы

- Выбор показателей и критериев эффективности
- Выбор и программирование классификаторов
- Выбор объемов обучающего, проверочного и тестового множеств
- Анализ угроз ИБ подсистеме непрерывной аутентификации и выработка механизмов их парирования
- Разработка и программирование алгоритмов методики
- Экспериментальный отбор информационно различительных признаков

### Этап обучения системы

**АРМ:** Сбор НПП с использованием резидентной программы **Сервер:**

- Очистка от выбросов, ошибок
- Агрегация первичных признаков, получение высокоуровневых первичных признаков: НПП -> ВПП
- Проверка достаточности ВПП
- Вычисление вторичных признаков: ВПП->ВП
- Разделение на обучающую и проверочную выборки
- Обучение классификаторов
- Контроль обучения классификаторов
- Запись результатов обучения в БД

### Этап непрерывной аутентификации

**АРМ:** Резидентная программа сбора НПП **Сервер:**

- Очистка от выбросов, ошибок
- Агрегация первичных признаков: НПП -> ВПП
- Проверка достаточности ВПП
- Вычисление вторичных признаков: ВПП->ВП
- Классификация
- Проверка аутентичности и выдача сигнала тревоги при отрицательном результате проверки

**Рис. 2.** Этапы применения методики и модели при разработке и эксплуатации подсистемы непрерывной аутентификации

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Методика, как и приведенная в [12] модель, была построена на основе изучения предшествующих научных работ [13-17], а также доступных датасетов по взаимодействию оператора с мышью. Таким образом, при проведении исследования применен «data-driven» подход, предложенный еще В.И. Лениным в его работе [18]: «От живого созерцания к абстрактному мышлению и от него к практике».

На *рисунке 2* показаны этапы применения методики и модели при разработке и эксплуатации подсистемы непрерывной аутентификации операторов. Предполагается, что специальное программное обеспечение, реализующее методику, располагается на сервере управления доступом, за исключением модуля сбора низкоуровневых первичных признаков (НПП) работы с мышью, который располагается на автоматизированном рабочем месте оператора (далее – АРМ).

### Резидентная программа сбора НПП

В описываемых далее программных экспериментах, которые подтверждают эффективность предлагаемой методики, используются доступные датасеты (Balabit, DFL, Shen, см. [12]). Вместе с тем, сбор НПП может быть достаточно просто реализован путем написания резидентной программы. Для каждого временного момента регистрируются следующие данные: координаты курсора мыши, факт нажатия/отжатия левой или правой кнопки мыши.

### Алгоритм очистки собранных данных от случайных выбросов, ошибок

Как видно из *рисунка 2*, первой выполняемой на сервере операцией является очистка от «выбросов» (ошибок).

Вначале удаляются все временные отрезки «покоя», то есть отрезки, в пределах которых не было ни клика, ни движения мыши. При проведении экспериментов была выбрана минимальная длительность участка «покоя», равная 2 секундам.

Далее выполняется поиск значений координат курсора мыши, которые резко отличаются от предыдущих («выброс»). При этом считается, что «выброс» в результате сбоя может произойти однократно, а вероятность двукратного сбоя мала, и ею можно пренебречь.

Пусть имеются значения координат точек  $Z_1(x_{i1}, y_{i1})$  и  $Z_2(x_{i2}, y_{i2})$ , зарегистрированные в моменты времени  $t_1, t_2$ . Находятся евклидовы расстояния между этими 2 точками  $d(Z_2-Z_1)$ , и если оно превышает порог  $T$ , точка  $Z_2$  считается кандидатом на «выброс».

Далее для каждого кандидата на «выброс» берутся следующие точки на временном интервале  $Z_3, Z_4, \dots$  и выполняется следующий алгоритм.

Если  $d(Z_3-Z_2) > T$  и  $d(Z_3-Z_1) < T$ , то точка  $Z_2$  – «выброс». Ее новые координаты определяются как  $x_{i2} = (x_{i3} - x_{i1}) \% 2$ ,  $y_{i2} = (y_{i3} - y_{i1}) \% 2$ , где знаком «%» обозначена процедура целочисленного деления.

Если  $d(Z_3-Z_2) < T$ , то точка  $Z_3$  считается началом следующей цепочки, а точка  $Z_1$  – окончанием предыдущей цепочки.

Если  $d(Z_3-Z_2) > T$  и  $d(Z_3-Z_1) > T$ , то точка  $Z_2$  – «выброс», а точка  $Z_3$  – кандидат на «выброс». И так далее, алгоритм продолжает свою работу.

При этом допускаются значения координат курсора, выходящие за границы координат экрана, в том числе и отрицательные значения. Это связано с особенностями работы контроллера мыши при выполнении оператором таких действий, как «drag-and-drop» вблизи границ экрана.

### Агрегация первичных признаков

Агрегация первичных признаков выполняется на основе использования формализма автомата Мили. *Таблица 1* состояний автомата Мили приведена ниже.

Диаграмма переходов состояний Мили приведена на *рисунке 3*.

На *рисунке 3* обозначены:

- состояния S6, S8, S10 – движения, соответ-

**Таблица 1**  
Описание состояний автомата Мили

Состояние	Перемещение	Нажатие клавиши	Интервал времени	Примечание
S0	Нет	Нет	-	Нет событий от мыши
S1	Нет	lp	-	Нажата левая клавиша
S2	Нет	lr	-	Отжата левая клавиша
S3	Нет	lp	$\Delta t \leq T_{кл}$	Двойной клик левой клавишей
S4	Нет	rp	-	Нажата правая клавиша
S5	Нет	rr	-	Отжата правая клавиша
S6	Да	lp	-	Нажата левая клавиша
S8	Да	rp	-	Нажата правая клавиша
S10	Да	Нет	-	Клавиша не нажата
S11	Нет	Нет	$\Delta t \leq T_{дв}$	Клавиша не нажата

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ственно, с зажатой левой, с зажатой правой клавишами и без нажатой клавиши;

- S3 определяется по малому времени между событиями нажатия клавиши;

- S11 определяется по не наступлению события нажатия клавиши мыши после окончания движения.

Вначале отделяются действия движения мыши, которые не завершаются кликом или двойным кликом (S10->S10). Такие действия в работе [12] мы назвали «бесцельным блужданием». Цель отделения заключается в том, что такие движения будут обрабатываться отдельно. Бесцельное блуждание характерно для бессознательных действий оператора, занятого, например, сторонним разговором. В пул бесцельных блужданий включаем все блуждания с длиной более 10 отрезков.

Отдельно выделяются заканчивающиеся кликом движения без нажатой клавиши мыши (S10->S11) от движения мыши с зажатой левой клавишей до ее отжатия («drag-and-drop» – S6->S2). В результате получаются две группы множеств точек, описывающих траектории движения мыши, от которых вычисляются вторичные признаки. Все вычисления для этих двух групп выполняются одинаково, но классифицировать их предлагается по отдельности.

Агрегация НПП продолжается до тех пор, пока не будет набрано нужное для обучения классификатора (или для вынесения решения классификатором) количество данных.

### Алгоритм уменьшения размерности пространства признаков и результаты его применения

В работе [15] было предложено множество статистик, вычисляемых от вторичных признаков, потенциально пригодных для решения задачи аутентификации операторов по их взаимодействию с мышью. Для того, чтобы подсистема непрерывной аутентификации работала эффективно эти признаки должны быть информативно важными, различительными для данной задачи.

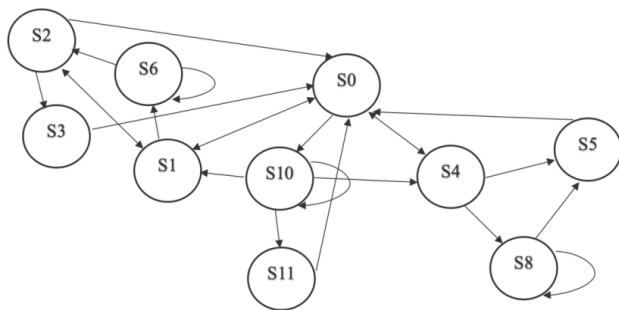


Рис. 3. Диаграмма переходов автомата Мили

Обучение и классификация с нерелевантными признаками может ухудшить эффективность подсистемы. Поэтому важным этапом методики является определение релевантных признаков и исключение остальных из рассмотрения. Помимо прямого влияния на эффективность классификации, редукция признаков вносит вклад и в уменьшение трудоемкости и требований по памяти вычислителя.

В методике предлагается использовать следующий алгоритм, основанный на определении взаимной информативности признаков.

Вход алгоритма: множество вторичных признаков:

$$\{VF_i^j\}, i = \overline{1..N}, j = \overline{1..M}, VF_i^j \in \mathbb{R}$$

где  $N$  – общее количество признаков до редукции;

$M$  – количество значений каждого признака (для упрощения записи считаем, что количество для всех признаков одинаковое)

**Шаг 1.** Для построения дискретного эмпирического распределения вероятностей каждого признака определим ширину интервала:

$$bin_i = \left( \max_{j=\overline{1..M}} VF_i^j - \min_{j=\overline{1..M}} VF_i^j \right) / L,$$

где  $L$  – число интервалов, (правило Стерджеса).

**Шаг 2.**  $\forall i$  находятся счетчики («вероятности»)  $p_i^k = \sum (VF_i^j \in [k * bin_i; (k + 1) * bin_i])$ , где  $k = \overline{0..L-1}$ , выражение  $(a \in b)$  равно 1 в случае истинности и 0 – в другом случае.

**Шаг 3.** Находится информативность каждого признака

$$I_i = - \sum_{k=0}^{L-1} p_i^k \log_2 p_i^k,$$

и признаки с  $I_i < T_i$  отбрасываются как неинформативные.

**Шаг 4.** Находится относительная энтропия (дивергенция) между всеми оставшимися признаками:

$$D(VF_i \| VF_k) = \sum_{j \in L} p_i^j \log(p_i^j / p_k^j),$$

где  $i \neq k, i = \overline{1..N}$ .

**Шаг 5.** В полученной матрице относительных энтропий для каждого признака выполняется суммирование по строкам. Остаются только те признаки, сумма дивергенций для которых превышает некоторый порог.

Выход алгоритма: редуцированное множество признаков.

В результате редукции из более чем 60 вторичных признаков было оставлено 6-8 (в зависимости от типа движения), а именно первые 2 момента от таких параметров, как изменение кривизны траектории, угол перемещения, время до клика после остановки мыши (для действия «движение к цели»), ускорение на начальном

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

участке траектории (для действия «движение к цели»), число критических точек (для действия «случайное блуждание»).

При проведении экспериментов исследовалась эффективность применения различных классификаторов, приведенных в *таблице 2*.

В качестве показателей эффективности идентификации оператора были взяты параметры «площадь под ROC-кривой» – AUC и значение равновероятности ошибок I и II рода (EER). В *таблице 2* приведены зависимости этих показателей от длительности отрезка активной работы с мышью оператора. Наилучшие результаты показал классификатор, основанный на стохастическом градиентном бустинге и реализованный в библиотеке XGBoost. Кроме того, была исследована эффективность идентификации оператора при различном числе зарегистрированных операторов (2,6,20,69), а также на полном и редуцированном наборе признаков. Результаты для полного набора признаков на 1,3-1,6% хуже, чем для редуцированного набора, что подтверждает важность редукции. С уменьшением числа операторов эффективность возрастает, и для 2 операторов стремится к 100% уже при 1 минуте активной работы с мышью (для классификатора XGBoost).

Была также проверена эффективность идентификации оператора при обучении и использовании различных датасетов. Она практически не отличалась от эффективности при использовании одного датасета [19] по работе с мышью.

Таким образом, можно отметить, что разработанная на основе модели [12] методика отвечает требованиям по ее реалистичности, воспроизводимости, соответствию целям и задачам планируемых действий, обоснованности и результативности.

### Заключение

В настоящей работе рассмотрены основные принципы идентификации оператора по ди-

намике работы с манипулятором типа «мышь». Приведены общий алгоритм работы системы в режиме обучения, а также в режиме эксплуатации. Применение данных алгоритмов вместе с набором обучающих признаков, приведенных в нашей статье [12], позволило создать надежную систему непрерывной фоновой непрерывной аутентификации оператора. Результаты экспериментов показали высокую эффективность предлагаемой методики, следовательно, ее применение позволяет повысить защищенность информационных систем. При практическом применении необходимо будет обратить внимание также и на специфические угрозы для систем, использующих технологии машинного обучения, которые рассмотрены в [20].

### Литература

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2012. Ч.1,2,3. М.: Стандартиформ, 2014. 366 с.
2. ГОСТ Р 58833-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Защита информации. Идентификация и аутентификация. Общие положения. М.: Стандартиформ, 2020. 32 с.
3. ГОСТ Р 52633.0-2006. Национальный стандарт Российской Федерации. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации. М.: Стандартиформ, 2007. 24 с.
4. ГОСТ Р 52633.1-2009. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию баз естественных биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. М.: Стандартиформ, 2010. 24 с.
5. ГОСТ Р 52633.2-2010. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к формированию синтетических биометрических образов, предназначенных для тестирования средств высоконадежной биометрической аутентификации. М.: Стандартиформ, 2011. 24 с.
6. ГОСТ Р 52633.3-2011. Защита информации.

**Таблица 2**

Результаты идентификации операторов по действиям с мышью (редуцированный набор признаков, 69 операторов). AUC и EER приведены в процентах

Время	20 сек		1 мин		3 мин		5 мин		7 мин	
	AUC	EER	AUC	EER	AUC	EER	AUC	EER	AUC	EER
Логрегрессия	71.25	26.1	72.3	19.4	75.7	16.8	76.8	13.2	78.1	11.3
SVM	84.45	21.2	88.1	16.8	90.3	13.9	94.6	9.3	95.4	8.2
LSTM	83.2	23.1	84.5	17.2	86.2	14.4	90.9	8.4	93.6	7.1
XGBoost	85.1	19.6	91.4	12.2	93.4	8.3	96.6	4.6	97.2	3.1

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.

7. ГОСТ Р 54412-2019. Информационные технологии. Биометрия. Общие положения и примеры применения. М.: Стандартинформ, 2019. 43 с.

8. ГОСТ Р 58624.1-2019. Информационные технологии. Биометрия. Обнаружение атаки на биометрическое предъявление. Ч.1. Структура. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

9. ГОСТ Р 58624.2-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Биометрия. Обнаружение атаки на биометрическое предъявление. Ч.2. Форматы данных. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.

10. ГОСТ Р 58624.3-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Биометрия. Обнаружение атаки на биометрическое предъявление. Ч.3. Испытания и протоколы испытаний. М.: Стандартинформ, 2019. 35 с.

11. Чио К. Машинное обучение и безопасность: защита систем с помощью данных и алгоритмов / К.Чио, Д.Фримэн. М.: ДМК Пресс, 2020. 388 с.

12. Грибунин В.Г., Лабазников А.П. Параметрическая модель работы оператора автоматизированной системы с манипулятором типа «мышь» // Известия Института инженерной физики, 2021. №4(62). С.48-53.

13. Диденко С.М. Разработка и исследование компьютерной модели динамики системы «пользователь-мышь». Дисс. на соиск... канд. техн. наук. Томск: ТГУ, 2007. 95 с.

14. Antal M., Fejer N. Mouse dynamics based user recognition using deep learning // Acta Univ. Sapientiae, Informatica, 2020. Vol.12. Issue 1. Pp. 39-50.

15. Thomas P., Mathew K. A broad review on non-intrusive active user authentication in biometrics // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021.

16. 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, 2021. May.

17. Bours P., Mondal S. Performance evaluation of continuous authentication systems // IET Biometrics, 2021. Vol.4 (4). Pp.220-226.

18. Ленин В.И. Философские тетради. Полн. собр. соч. Издание 5-е. Т.29. М.: Издательство политической литературы, 1969. С.152-153.

19. Датасет Balabit [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/balabit/Mouse-Dynamics-Challenge> (дата обращения 10.08.2021).

20. Грибунин В.Г., Гришаненко Р.А., Лабазников А.П., Тимонов А.А. Безопасность систем машинного обучения. Защищаемые активы, уязвимости, модель нарушителя и угроз, таксономия атак // Известия Института инженерной физики, 2021. №3(61). С.65-71.



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.912

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЛЛЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕКСТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ДОКУМЕНТОВ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

## USING A COLLECTION OF ELECTRONIC TEXTS TO IMPROVE THE ACCURACY OF DOCUMENT CLASSIFICATION IN A SPECIAL- PURPOSE INFORMATION SYSTEM

**Сергей Евгеньевич Потапов**

доктор технических наук  
доцент кафедры  
ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 143900, Московская обл.,  
г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8  
Тел.: 8 (916) 858-99-34  
E-mail: 41kaf\_rabota@mail.ru

**Владимир Александрович Попов**

адъюнкт  
ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 143900, Московская обл.,  
г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8  
телефон: 8 (916) 649-80-52  
E-mail: mail@vpopov.su

**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-roskosmos.ru

### Аннотация

В работе предложен способ повышения точности классификации документов в информационной системе за счет использования коллекции электронных текстов с письменными языковыми данными по специальной тематике. В основе способа лежит выделение и последующее ранжирование ключевых слов из эталонного набора документов, относящегося к каждому отдельному классу. Для ранжирования ключевых слов рассчитываются и суммируются вероятностно-энтропийные показатели. Одним из важных показателей является отличие распределения ключевого слова в эталонном наборе и в коллекции электронных текстов. Данный показатель позволяет отделить общеупотребительные слова от специализированных, наиболее точно характеризующих принадлежность документа к конкретному классу, и тем самым повысить точность классификации.

**Ключевые слова:** классификация текстовых документов, информационная система, обработка информации, коллекция электронных текстов.

### Summary

The paper proposes a method for improving the accuracy of classifying documents in an information system by using collections of electronic texts with written language data on special topics. The method is based on the selection and subsequent ranking of keywords from a reference set of documents related to each individual class. To rank keywords are calculated and the probabilistic-entropy indicators are summarized. One of the important indicators is the difference in the distribution of the keyword in the reference set and in the collection of electronic texts. This indicator allows you to separate commonly used words from specialized ones, which most accurately characterize the belonging of a document to a particular class, and thereby increase the accuracy of classification.

**Keywords:** classification of text documents, information system, information processing, collection of electronic texts.

### Введение

Для решения задач управления войсками, в органах военного управления собирается и обобщается большое количество информации. В процессе своей деятельности должностные лица получают и обрабатывают информационные донесения, доклады, планы, отчеты, справки от

подчиненных и вышестоящих органов военного управления, а также различные данные из открытых источников.

Анализ деятельности органов военного управления показывает, что объем обрабатываемой информации постоянно увеличивается. Для работы с большими объемами информации



## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

в ВС РФ создаются различные информационные системы. Данные системы в том числе предназначены для автоматизированной обработки электронных текстовых документов. При этом значительную долю от общего объема обрабатываемых информационными системами данных составляют неструктурированные (слабоструктурированные) электронные текстовые документы, автоматическая обработка которых представляет значительную сложность [1].

В настоящее время задача классификации электронных текстовых документов решается при помощи различных систем.

В данных системах используются статистические методы и методы, основанные на нейронных сетях. К статистическим методам классификации относят методы на основе Байесовского классификатора, линейный дискриминантный анализ, вероятностный латентный семантический анализ и другие. К методам, на основе нейросетевых моделей, относят методы с применением сверточных и рекуррентных нейронных сетей [2].

Общим недостатком данных методов является низкая точность классификации при малом размере обучающей выборки и большом количестве одинаковых общеупотребительных слов в документах из различных классов [3].

Для классификации электронных текстовых документов в информационной системе специального назначения предлагается использовать способ на основе вероятностно-энтропийных показателей и множества эталонных наборов текстовых документов. Эталонный набор текстовых документов представляет собой небольшую эталонную коллекцию документов (несколько десятков образцов) наиболее характерных для каждого конкретного класса. Документы в эталонную коллекцию отбираются экспертами.

Похожий алгоритм предложен в работе

Vidhya Govindaraju и Krishnan Ramanathan «Similar document search and recommendation» и в работе И.А. Молошников, А.Г. Сбоев и Д.В. Гудовских «Алгоритм отбора тематически схожих документов с построением контекстно-семантического графа на основе вероятностно-энтропийного подхода» [4]. В выше описанных работах авторы использовали свои алгоритмы для отбора тематически схожих документов из большого хранилища информации на основе предложенного пользователем образца документов для поиска. Вероятностно-энтропийный способ, изложенный в данной работе, предлагается использовать для классификации текстовых документов. Также предлагается использовать еще один вероятностный показатель – индикатор выделения общеупотребительных слов.

### Формальная постановка задачи классификации

Пусть имеется множество текстовых документов, подлежащих классификации  $D=\{d_1, \dots, d_{(D)}\}$  и множество заранее определенных категорий (классов)  $C=\{c_1, \dots, c_{(C)}\}$ . Искомая функция  $F:D \times C \rightarrow \{0,1\}$  задается формулой

$$F(d_i, c_j) = \begin{cases} 0, & \text{если } d_i \notin c_j, \\ 1, & \text{если } d_i \in c_j. \end{cases} \quad (1)$$

Необходимо найти классификатор  $F'$ , максимально близкий к  $F$ .

Для нахождения классификатора  $F'$  (обучения) необходим набор примеров – эталонный набор  $L$ , соответствующий каждому классу. Для проведения оценки качества классификации необходима тестовая выборка  $T$ .

При этом должно выполняться следующее условие

$$L \cap T = \emptyset \quad (2)$$

Также  $L$  и  $T$  должны принадлежать одному классу.

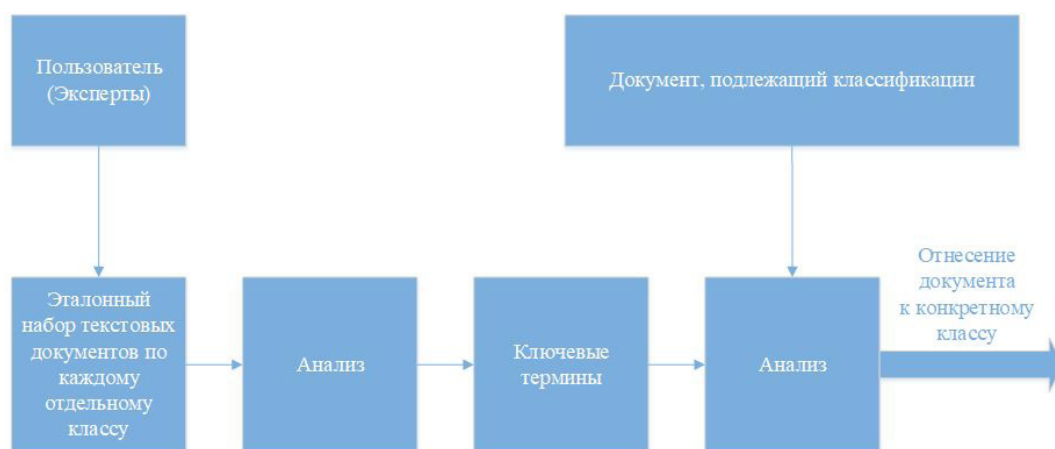


Рис. 1. Схема классификации электронных текстовых документов

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Вероятностно-энтропийный способ классификации с применением коллекции электронных текстов

На *рисунке 1* представлена общая схема способа автоматической классификации текстовых документов.

При анализе документов эталонного набора, для каждого документа набора формируется его представление. Для этого слова приводятся к нормальной форме (лемматизируются), далее текст разбивается на отдельные предложения. Затем осуществляется словарная фильтрация предлогов, союзов и похожих общеупотребительных слов.

После осуществления предварительной обработки текста для каждого отдельного набора определяется 1000 наиболее частотных слов. Далее в тексте ключевые слова мы будем называть терминами. Затем для каждого термина вычисляется расстояние Кульбака-Лейблера, величина информационной энтропии и индикатор выделения общеупотребительных слов. Данные показатели нормируются и складываются. Полученная сумма является рангом термина. После этого термины ранжируются от большего к меньшему. 100 верхних терминов с наибольшим рангом являются ключевыми для каждого отдельного класса и формируют его представление.

Показатель, основанный на дивергенции Кульбака-Лейблера, рассчитывается для каждого термина из 1000 наиболее частотных для каждого отдельного класса по формуле

$$D(w) = \sum P_{doc}(w;d) * \ln((P_{doc}(w;d)/P_n(d))), \quad (3)$$

где  $P_n$  – вероятность встретить термин  $w$  в эталонном наборе документов каждого класса, относительно длины документа  $d$

$$P_n(d) = N(d) / \sum N(x), \quad (4)$$

где  $N(d)$  – общее количество терминов в документе  $d$ ;

сумма  $N(x)$  – общее количество терминов  $x$  во всех документах эталонного набора каждого класса  $D$ ;

$P_{doc}(w;d)$  – вероятность встречаемости термина  $w$  в документе  $d$

$$P_{doc}(w;d) = tf(w;d) / F(w), \quad (5)$$

где  $tf(w; d)$  – встречаемость термина  $w$  в документе  $d$ ;

$F(w)$  – встречаемость термина  $w$  во всех документах эталонного набора каждого класса  $D$ .

Данный показатель характеризует отличие фактического распределения термина  $w$  от предполагаемого. Поскольку с ростом размера документа растет и количество терминов в нем, что в свою очередь увеличивает вероятность случайного попадания термина  $w$  в документ  $d$ .

Чем меньше величина показателя  $D(w)$ , тем более характерен данный термин для эталонного набора. И наоборот. Большое значение  $D(w)$  говорит о не характерности данного термина для эталонного набора.

Информационная энтропия показывает равномерность распределения  $P_{doc}(w;d)$  термина  $w$  в документах  $d$  эталонного набора каждого класса  $D$  и рассчитывается по формуле

$$H(w) = \sum P_{doc}(w;d) * \ln(1 / P_{doc}(w;d)), \quad (6)$$

где  $P_{doc}(w;d)$  – вероятность встречаемости термина  $w$  в документе  $d$

$$P_{doc}(w;d) = tf(w;d) / F(w), \quad (7)$$

где  $tf(w; d)$  – встречаемость термина  $w$  в документе  $d$ ,

$F(w)$  – встречаемость термина  $w$  во всех документах эталонного набора каждого класса  $D$ .

Большое значение данного показателя свидетельствует о равномерном распределении термина  $w$  по всем документам эталонного набора каждого класса. Если он равен 0, то это означает, что термин  $w$  встречается только в одном документе эталонного набора.

### Показатель выделения общеупотребительных слов

Индикатор показывает отличие распределения слова  $w$  в эталонной коллекции и в Коллекции электронных текстов. Коллекция электронных текстов представляет из себя набор из более чем трех тысяч документов по военной тематике (различные приказы, директивы, указания, переписка между военными организациями и предприятиями промышленности).

Индикатор рассчитывается по формуле

$$r(w) = P_e(w) / P_k(w), \quad (8)$$

где  $P_e$  – относительная частота встречаемости термина в эталонном наборе, а  $P_k$  – относительная частота встречаемости термина в Коллекции электронных текстов. Данный индикатор позволяет выделить большую часть общих слов, если они хорошо представлены в корпусе. Для общеупотребительных он будет иметь значение около 1, а для специализированных слов – много больше 1.

Принадлежность документа конкретному классу определяется следующим образом. Из представления каждого класса отбираются ключевые термины, входящие в документ, учитывая количество вхождений. Затем путем простого суммирования рангов терминов определяется ранг документа. Чем выше вычисленный ранг документа, тем ближе документ к соответствующему эталонному набору документов каждого класса.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### Оценка качества классификации

Проведена оценка качества классификации двумя классификаторами.  $F_1$  – без использования показателя выделения общеупотребительных слов и  $F_2$  – с использованием показателя выделения общеупотребительных слов. Эксперты разделили 400 документов на четыре класса – «Приказы Министра обороны», «Переписка по вопросам выполнения государственного оборонного заказа», «Переписка по вопросам участия в научных конференциях», «Переписка по вопросам выполнения научно-исследовательских работ». При этом каждый документ принадлежал только одному классу.

По 30 документов из каждого класса использовались в качестве эталонного набора  $L$ . И по 70 документов – в качестве тестовой выборки  $T$ .

Оценка качества проводилась по комбинации критериев точности (ассигасу) и полноты (recall).

Возможны четыре результата классификации документа при помощи автоматического классификатора – положительный, отрицательный, ложноположительный, ложноотрицательный (см. таблицу 1).

Полнота вычисляется по формуле

$$R = TP / (TP + FP) \quad (9)$$

Точность вычисляется по формуле

$$A = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) \quad (10)$$

В результате эксперимента получены следующие результаты.

Для классификатора  $F_1$  (без использования показателя выделения общеупотребительных слов) полнота  $R=0,81$  и точность  $A=0,89$ . Для классификатора  $F_2$  (с использованием показателя выделения общеупотребительных слов) полнота  $R=0,83$  и точность  $A=0,95$ .

### Заключение

Использование в качестве дополнительного индикатора показателя выделения общеупотребительных слов, рассчитываемого на основе коллекции электронных текстов, позволило повысить точность и полноту классификации текстовых документов по военной тематике. При этом значение точности, несмотря на малый размер обучающей выборки, составило 95%.

### Литература

1. Отчет о НИР «Исследование вопросов применения технологий искусственного интеллекта в интересах автоматизации деятельности органов военного управления (Шифр «ВЕЛЕС»). М.: ЦНИИ МО РФ, 2019.
2. Молошников И.А., Сбоев А.Г., Рыбка Р.Б., Гудовских Д.В. Комплекс вероятностно-энтропийных и интеллектуальных алгоритмов для эмотивно-тематического анализа эволюции общественного мнения в интернет сетях // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, 2016. №3(5). С.262-267.
3. Молошников И.А., Рыбка Р.Б., Сбоев А.Г., Гудовских Д.В., Иванов И.И. Двухуровневая модель нейронной сети глубокого обучения для задачи морфологического разбора предложений русского языка // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, 2017. №6(6). С.555-562.
4. Молошников И.А., Сбоев А.Г., Гудовских Д.В. Алгоритм отбора тематически схожих документов с построением контекстно-семантического графа на основе вероятностно-энтропийного подхода // Вестник Воронежского государственного университета, 2015. №3. С.64-70.

**Таблица 1**

Оценка качества работы классификатора

Категория $c_j$		Экспертная оценка	
		Положительная	Отрицательная
Оценка классификатора	Положительная	TP	FP
	Отрицательная	FN	TN



# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.182

## ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕТРИИ КВАНТОВОГО ВАКУУМА В РАССЛОЕНИЯХ АФФИННЫХ И ТОРИЧЕСКИХ ПРОЕКТИВНЫХ ПРОСТРАНСТВ

## FEATURES OF THE QUANTUM VACUUM GEOMETRY IN BUNDLES OF AFFINE AND TORIC PROJECTIVE SPACES

**Сергей Владимирович Смуров**

почетный работник науки и техники РФ  
доктор технических наук, профессор  
Первый Вице-президент Института –  
Главный конструктор  
АНО «ИИФ»

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

**Геннадий Германович Волков**

доктор физико-математических наук, профессор  
старший научный сотрудник  
АНО «ИИФ»

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

### Аннотация

Торическая геометрия является очень эффективным инструментом для анализа многих аспектов теорий многомерных суперструн/D-бран с использованием комплексных проективных и квазипроjektивных Келлеровых/Калаби-Яу пространств. Наш интерес к изучению этих пространств и возможных их расслоений вызван тем, что они тесно пересекаются с вопросами квантовой информации, в частности, с многомерными проективными пространствами высших квантовых состояний – многокубитовых или гибридных кубит-кудитовых систем.

**Ключевые слова:** комплексная проективная геометрия кудитов, голоморфные расслоения, дифференциальные формы, проективные многообразия, Келлеровы многообразия, Калаби-Яу пространства, алгебраические многообразия, торическая геометрия, алгебра проективных рефлексивных чисел.

### Summary

Toric geometry is a very effective tool for analyzing many aspects of high-dimensional superstring/D-brane theories using complex projective and quasi-projective Keller/Calabi-Yau spaces. Our interest in the study of these spaces and their possible bundles is due to the fact that they closely intersect with questions of quantum information, in particular, with multidimensional projective spaces of higher quantum states – multi-qubit or hybrid qubit-qudit systems.

**Keywords:** complex projective geometry of qudits, holomorphic bundles, differential forms, projective manifolds, Kähler manifolds, Calabi-Yau spaces, algebraic manifolds, toric geometry, algebra of projective reflexive numbers.

### 1. Введение. Квантовые вакуумы и торическая геометрия

Торическая геометрия в области теории квантовой физики и квантовой информации тесно связана с основными понятиями алгебраической геометрии [1-12]. Поскольку предмет алгебраической геометрии часто рассматривается с одной стороны, как очень абстрактный, в то время как с другой стороны, струнные теоретики обычно используют его довольно эвристическим образом [6,9-13]. Торическая геометрия это очень конкретная область алгебраической геометрии, в которой можно работать со многими важнейшими для понимания примерами [2-8].

Структура вакуума – основной момент пересечения этих двух направлений: пространство вакуума любой суперсимметричной калибровочной теории имеет алгебраическую природу. Для квантовой информации проективная многомерная компактная геометрия чистых и смешанных квантовых состояний представляет исключительный интерес, который усиливается с учетом их возможных некомпактных «взаимодействий» с вакуумом окружающей среды [13-16]. Какое место в этом контексте занимает торическая геометрия? Существует очень интересный пример в классе суперсимметричных калибровочных теорий, пространство вакуума

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

которых является торическим. Эти теории являются так называемыми калибровочными теориями торического веера. Они естественным образом появляются в теории струн как низкоэнергетическая эффективная теория D3-бран, зондирующих торические особенности Калаби-Яу пространств. Цель состоит в том, чтобы объяснить торические сингулярности Калаби-Яу пространств, и предложить некоторые основные математические инструменты, необходимые для работы с моделями, включающими их в теорию струн, а также с возможностями их использования в квантовой информации. Например, можно описать множество Калаби-Яу многообразий, их компактификации, как гиперповерхности в компактных торических проективных многообразиях [8,9,11,12]. Изучение общего случая компактных квазипроjektивных торических многообразий подчеркивает важность локальных торических аффинных многообразий в качестве строительных блоков.

### 2. Алгебраическая геометрия

Поскольку торическая геометрия является частью алгебраической геометрии, то начинать надо с введения основных понятий алгебраической геометрии [1,2]. Сначала определяются аффинные многообразия, существование эквивалентности между геометрическими объектами (многообразиями) и алгебраическими объектами, задаваемыми некоторыми определенными наборами многочленов, так называемыми простыми идеалами. Далее необходимо рассматривать проективные пространства, являющиеся простейшими примерами торических многообразий [7-9,11,12]. Условие построения Калаби-Яу пространства потребует понятие линейного расслоения, что использует понятия дифференциальной геометрии, основы теории расслоений. Торические многообразия можно рассматривать как фактор голоморфных многообразий, путем введения локальных координат в терминах аффинных многообразий. Заметим, что нас могут интересовать как компактные, так и некомпактные торические многообразия, в частности, компактные Калаби-Яу гиперповерхности в компактных торических многообразиях (varieties) с возможными сингулярностями и путями их разрешения. В рамках торической геометрии можно кодировать свойства алгебраических многообразий в терминах вееров или многогранников, определенных на целочисленных решетках [7-12]. В частности, как показано в [9], условие Калаби-Яу для гиперповерхностей торических многообразий эквивалентно рефлексивности лежащего в основе

многогранника. Более того, дуальность рефлексивных многогранников соответствует зеркальной симметрии полученного класса многообразий Калаби-Яу (см., например, [11,12]). Одним из главных открытий «первой суперструнной революции» был тот факт, что Калаби-Яу пространства имеют решающее значение для компактификации D=10,11,12-мерных суперструн. Во время «второй струнной революции» были активно использованы структуры расслоения многообразий Калаби-Яу, сыгравшую свою роль в открытии различных непertурбативных струнных дуальностей. В частности, K3-расслоения оказались необходимы для дуальности между гетеротической и IIA-теориями [13], а эллиптические расслоения - необходимы для компактификации F-теории [8,10,13]. Опять же, торическая геометрия предоставляет прекрасные инструменты для изучения соответствующих фибровых структур. Так зеркальный многогранник  $\Delta_f^*$ , соответствующий фибру ведет себя как подмногогранник в  $\Delta^*$  с той же внутренней точкой, тогда как базовое пространство является торическим многообразим, веер которого можно определить, проецируя исходный веер на линейное подпространство, натянутое на  $\Delta_f^*$  [9]. Это основная причина интереса к классификации 2-х, 3-х, 4-х... мерных рефлексивных многогранников и их структур в контексте теории струн [8,10,11,12].

В геометрии всегда имеем дело с некоторым набором «точек», который имеет какую-то структуру. Набор точек вместе с топологией называется топологическим пространством. Топологическое пространство, локально похожее на евклидово пространство  $\mathbb{R}^n$ , называется уже многообразием. Если, кроме того, функции перехода дифференцируемы (например,  $C^\infty$ ), то оно называется дифференцируемым многообразием. Гладкие алгебраические многообразия можно рассматривать как особый вид многообразий, более простых в каком-то смысле. С другой стороны, общие алгебраические многообразия не являются вообще многообразиями, поскольку они позволяют иметь различные особенности.

Алгебраические многообразия можно рассматривать как алгебраическое множество нулей ряда полиномов. Выбирая какую-то функцию  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , можно определить подмножество в  $\mathbb{R}^n$ :

$$\mathbb{R}^n \supset \Sigma = \{f^{-1}(0)\} = \{x \in \mathbb{R}^n \mid f(x) = 0\}, \quad (1)$$
которое локально наследует структуру многообразия  $\mathbb{R}^n$  [1,2,6-12]. Однако  $\Sigma$  вообще может иметь сингулярности [9,10,13]. Если ограничить выбор функции  $f$  в виде полинома, то, все станет намного проще, что явится одним из значительных преи-

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

моществ алгебраического подхода алгебраической геометрии при появлении сингулярностей. Сначала определяются аффинные многообразия, которые являются основными объектами алгебраической геометрии. Далее определяется проективное пространство  $CP^n$ , дающее пример конструкции голоморфного фактора, с соответствующими проективными подпространствами в  $CP^n$  [2-10].

### 3. Аффинные алгебраические расслоения

Многообразия, определенные как алгебраические подмножества  $C^n$ , соответствуют аффинным многообразиям. На базе пространства  $C^n = \{x_1, \dots, x_n\}$  строится коммутативное кольцо многочленов от  $n$  переменных:  $\mathcal{R}_n = C[x_1, \dots, x_n]$ , являющееся аддитивной группой вместе с ассоциативным произведением, дистрибутивным относительно сложения. Алгебраическое подмножество  $Z(I)$  в  $C^n$  определяется как геометрическое место нулей множества многочленов [1,2,6]

$$I \subset \mathcal{R}_n : Z(I) = \{(x_1, \dots, x_n) \in C^n \mid p_i(x_1, \dots, x_n) = 0, \forall p_i \in I\}. \quad (2)$$

С другой стороны, для любого подмножества  $t \in I$  обозначим множество всех полиномов, обращающихся в нуль на  $Y$  через  $J(Y)$ .

Вся идея алгебраической геометрии состоит в том, что можно определять пространство с помощью алгебры функций, определенных на нем. Так можно брать в качестве функций полиномы, определенные на алгебраическом множестве. Два многочлена  $p_1$  и  $p_2$  принимают одно и то же значение на  $Z(I)$ , если  $p_1 - p_2 = t$ , при некотором  $t \in I$ , поскольку  $t$  обращается в нуль на  $Z(I)$  по определению. То есть необходимо только рассматривать классы эквивалентности полиномов в  $R^n$ , линейно эквивалентных с точностью элементов  $I$ :

$$A(Z(I)) = C[x_1, \dots, x_n]/I. \quad (3)$$

Необходимо, чтобы этот фактор определял собственное кольцо функций на  $Z(I)$ . Это происходит, если  $I$  идеал кольца  $C[x_1, \dots, x_n]$ . Учитывая любой набор полиномов, его нетрудно обобщить в полноценный идеал, как видно в примерах ниже. Порожденный таким образом идеал обычно обозначают через  $(p_1, \dots, p_k)$  [1,2,6]. На самом деле это верно для радикала  $P$ , который является более слабым условием. Имеется однозначное соответствие между алгебраическими множествами и радикальными идеалами. Кольцо  $A(\cdot) = C[x_1, \dots, x_n]/P$ , называется координатным кольцом или структурным кольцом аффинного многообразия. Пример: конифолд  $C_0$ , возникший в разработках в теории струн, представляет собой аффинное многообразие, определяемое одним уравнением в  $C^4$ :  $x_1 x_2 - x_3 x_4 = 0$ , так называемое трехмерное многообразие с обычной двойной точкой или узлом. Его координатное кольцо [2-8]

$$A(C_0) = C[x_1, x_2, x_3, x_4]/(x_1 x_2 - x_3 x_4) \quad (4)$$

### 4. Торические проективные пространства и расслоения

Аффинные многообразия, определяемые полиномиальными уравнениями в  $C^n$ , не компактны. Проективное пространство  $CP^n$  – простейший пример компактного алгебраического многообразия (на самом деле оно торическое). Стандартный способ определить это как набор комплексных прямых в  $C^{n+1}$

$$CP^n = (C^{n+1} \setminus \{0\})/C^*. \quad (5)$$

Действие тора  $C^* = C \setminus \{0\}$  состоит в умножении всех координат в  $C^{n+1}$  на  $\lambda \in C^*$ , что определяет отношение эквивалентности

$$[x_0, \dots, x_n] \sim \lambda [x_0, \dots, x_n].$$

Результирующее пространство является полностью регулярным,  $x_i$  называются однородными координатами, а точка в  $CP^n$  представляется классом эквивалентности  $[x_0, \dots, x_n]$ . Мы можем покрыть  $CP^n$   $n+1$  аффинными патчами, по одному для каждого  $x_i \neq 0$ . Локальные координаты  $i$ -патча равны  $z_k^{(i)} = x_k/x_i$ , функции перехода  $\Phi_{ik}$  это рациональные функции:  $z_i^{(j)}/z_k^{(i)}$ . Наиболее известным примером является сфера Римана  $CP^1$ . Она имеет два патча, переходная функция на экваторе  $z_N = 1/z_S$ .

Можно определить подмногообразия в  $CP^n$ , рассматривая их как множества исчезающих значений полиномов  $p_i \in R^{n+1}$ . Для того чтобы уравнения  $p_i = 0$  имели смысл в  $CP^n$ , они должны быть постоянными на любом классе эквивалентности  $[x_0, \dots, x_n]$ , что означает, что полиномы  $p$  должны быть однородными (т.е. являются суммами мономов фиксированной степени):  $p_i(\lambda x_0, \dots, \lambda x_n) \sim \lambda^d p_i(x_0, \dots, x_n)$ . Для однородного простого идеала  $P_h$  в  $R_{n+1}$  ассоциированное проективное “верайти” (variety) определяется как  $\Sigma(P_h) = \{[x_0, \dots, x_n] \mid p_i = 0 \forall p_i \in P_h \subset \mathcal{R}_{n+1}\}$ . (6)

Легко проверить, что если  $p_i$  однородны степени  $d$ , то и идеал  $(p_i)$  однороден. Однородное координатное кольцо обозначается  $S(\Sigma) = R_{n+1}/P_h$ .

Среди уже обсуждаемых примеров [4-6] интересным случаем [3,6,7] торического многообразия является поверхность Хирцебруха  $H_q$  (рисунок 1). Пусть  $q \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  и рассмотрим веер

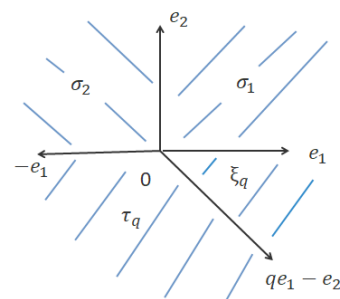


Рис. 1. Веер  $\Sigma_q$

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

$\Sigma_q = F(\sigma_1, \sigma_2, \tau_q, \xi_q)$ , где  $\sigma_1 = C(e_1, e_2)$ ,  $\sigma_2 = C(-e_1, e_2)$ ,  $\tau_q = C(-e_1, qe_1 - e_2)$ ,  $\xi_q = C(e_1, qe_1 - e_2)$ .

Поверхность Хирцебруха  $H_q$  определяется как  $H_q = X_{\Sigma_q}$ . Для явного описания  $H_q$ , необходимо выполнять конструкцию склейки:

$$\begin{aligned} S_{\sigma_1} &= \langle e_1, e_2 \rangle, & R_{\sigma_1} &= C[x_1, x_2], & X_{\sigma_1} &= A^2_{(x_1, x_2)}; \\ S_{\sigma_2} &= \langle -e_1, e_2 \rangle, & R_{\sigma_2} &= C[x_1^{-1}, x_2], & X_{\sigma_2} &= A^2_{(x_1^{-1}, x_2)}; \quad (7) \\ S_{\tau_q} &= \langle -e_1 - qe_2, -e_2 \rangle, & R_{\tau_q} &= C[x_1^{-1}x_2^{-q}, x_2^{-1}], & X_{\tau_q} &= A^2_{(x_1^{-1}x_2^{-q}, x_2^{-1})}; \\ S_{\xi_q} &= \langle e_1 + qe_2, -e_2 \rangle, & R_{\xi_q} &= C[x_1x_2^q, x_2^{-1}], & X_{\xi_q} &= A^2_{(x_1x_2^q, x_2^{-1})}. \end{aligned}$$

Склейка  $X_{\sigma_1}$  и  $X_{\xi_q}$  дает  $X_{F(\tau_q, \xi_q)} = P^1_{(s_0, s_1)} \times A^1_{x_2^{-1}}$ , где  $x_1 = t_0/t_1$ . Аналогично, склейка  $X_{\sigma_2}$  и  $X_{\tau_q}$  дает  $X_{F(\xi_q, \tau_q)} = P^1_{(s_0, s_1)} \times A^1_{x_2^{-1}}$ , где  $x_1x_2^q = s_0/s_1$ . Теперь склеим  $X_{F(\sigma_1, \sigma_2)}$  и  $X_{F(\tau_q, \xi_q)}$  вдоль  $P^1 \times (A^1 \setminus \{0\})$  со следующим отождествлением

$$\psi: P^1_{(t_0, t_1)} \times (A^1_{x_2} \setminus \{0\}) \rightarrow P^1_{(s_0, s_1)} \times (A^1_{x_2^{-1}} \setminus \{0\}) \quad (8)$$

$$((a:b), c) \rightarrow ((a^q:b), c^{-1}).$$

В результате поверхность  $H_q$  равна

$$X = \{((u_0 : u_1 : u_2), (v_0 : v_1)) \in P^2 \times P^1 : u_0 v_0^q = u_1 v_1^q\} \quad (9)$$

Действительно, есть вложения

$$\varphi_1: P^1_{(t_0, t_1)} \times A^1_{x_2} \rightarrow P^2 \times P^1; ((a:b), c) \rightarrow ((a:ac^q:b), (c:1)) \quad (10)$$

$$\varphi_2: P^1_{(s_0, s_1)} \times A^1_{x_2^{-1}} \rightarrow P^2 \times P^1; ((d:e), f) \rightarrow ((df^q:d:e), (1:f)), \quad (11)$$

которые удовлетворяют  $\varphi_1|_{P^1 \times (A^1 \setminus \{0\})} = \varphi_2 \circ \psi$  и  $\text{Im}(\varphi_1) \cup \text{Im}(\varphi_2) = X$ . Если взять предельный случай  $q=0$ , то

$$H_0 = \{((u_0 : u_1 : u_2), (v_0 : v_1)) \in P^2 \times P^1 : u_0 v_0^0 = u_1 v_1^0\} \cong P^1 \times P^1 \quad (12)$$

Известно, что расслоение – это данные  $(E, V, F, \pi)$ , где  $E, V$  и  $F$  – алгебраические многообразия и  $\pi: E \rightarrow V$  – сюръективный морфизм, такой что для каждого элемента  $b \in V$  существует открытое подмногообразие  $U \subset V$ , содержащее  $b$  и изоморфизм  $\psi: \pi^{-1}(U) \rightarrow U \times F$  такое, что  $\pi_* \psi = \pi|_{\pi^{-1}(U)}$ , где  $\pi_*: U \times F \rightarrow U$  – проекция на первую координату. Расслоение  $(E, V, F, \pi)$  называется  $F$ -расслоением над  $V$ .

Для  $q \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$  поверхность Хирцебруха  $H_q$  представляет собой  $P^1$ -расслоение над  $P^1$ . Пусть  $\pi: H_q \rightarrow P^1$  – проекция на вторую координату. Тогда  $(H_q, P^1, P^1, \pi)$  – расслоение. Ясно, что  $\pi$ -сюръективный морфизм.  $U_0$  и  $U_1$  – координатные карты  $P^1$ :

$$\pi^{-1}(U_0) = \{((d:e), f) \rightarrow ((df^q:d:e), (1:f)) \in P^2 \times P^1 : ((d:e), f) \in P^1 \times C\} \quad (13)$$

$$\pi^{-1}(U_1) = \{((a:ac^q:b), (c:1)) \in P^2 \times P^1 : ((a:b), c) \in P^1 \times C\} \quad (14)$$

Итак, у нас есть изоморфизмы

$$\psi_0 = \pi^{-1}(U_0) \xrightarrow{\cong} U_0 \times P^1, ((df^q:d:e), (1:f)) \rightarrow ((1:f), (d:e)) \quad (15)$$

$$\psi_1 = \pi^{-1}(U_1) \xrightarrow{\cong} U_1 \times P^1, ((a:ac^q:b), (c:1)) \rightarrow ((c:1), (a:b)) \quad (16)$$

удовлетворяющие требуемому условию. так как  $U_0$  и  $U_1$  образуют открытое покрытие  $P^1$ .

## 5. О некомпактных Калаби-Яу многообразиях в торической геометрии

В приложениях к физике струн мы в основном имеем дело с так называемыми Калаби-Яу пространствами (CY). Их расширения на пространства с особенностями оказались очень интересными, так как многие новые струнные явления, такие как процессы изменения топологии, происходят в присутствии сингулярностей. Голomorphic линейное расслоение (или для краткости линейное расслоение) соответствует голоморфному векторному расслоению первого ранга, то есть слою  $S$ . Очень важным линейным расслоением является каноническое расслоение  $K_X$ , которое строится как  $n$ -я степень внешнего произведения  $T^*X$ :

$$C \rightarrow K^* X \equiv \Lambda^{(n,0)} T^* X \xrightarrow{-\pi} X. \quad (17)$$

Сечения канонического расслоения являются голоморфными  $n$ -формами в следующем виде (в каждой координатной карте)

$$\Omega = f(z) dz_1 \wedge \dots \wedge dz_n, \quad (18)$$

где  $f(z)$  некоторая голоморфная функция. Одно из определений Калаби-Яу пространства состоит в том, что каноническое расслоение для него тривиально, т.е.

$$\Lambda^{(n,0)} T^* X \cong C \times X \quad (19)$$

Глобальное сечение  $\Omega$  (вплоть до масштабирования постоянное) называется голоморфной  $n$ -формой многообразия Калаби-Яу  $X$ . Для определения Калаби-Яу многообразия важным моментом является предположение о компактности или некомпактности многообразия.

Так в случае компактного Калаби-Яу многообразия существуют 5 эквивалентных определений: это кэлерово многообразие  $(M, J, g)$  вещественной размерности  $2n$  со следующими условиями:

1. Нулевая Риччи-форма;
2. Исчезновение первого класса Черна  $c=0$ ;
3. Группа голономии  $\text{Hol}(g) = \text{SU}(n)$  или  $\text{Hol}(g) \subseteq \text{SU}(n)$ ;
4. Допускает глобально определенную и нигде не исчезающую голоморфную  $n$ -форму;
5. Тривиальное каноническое расслоение –  $K_X=0$

Если принимать за определение Калаби-Яу многообразия как кэлерово многообразие  $(M, J, g)$  с тривиальным каноническим расслоением (пункт 5), то это определение применимо не только для компактных, но и для некомпактных многообразий Калаби-Яу. Базируясь на этом определении в торической геометрии можно показать, компактно ли торическое многообразие или нет. Так торическое многообразие  $M_\Sigma$  компактно тогда и только тогда, когда его веер  $\Sigma$  заполняет решетку  $N_R$ .

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Торическое многообразие задается выражением

$$M_\Sigma = C^n \setminus Z(\Sigma) / G, \quad (23)$$

где  $G$  является  $(C^*)^{n-3}$  раз конечной абелевой группой. Фактор по  $(C^*)^{n-3}$  реализуется как классы эквивалентности по отношению к следующим отношениям эквивалентности между координатами  $w_i$ :

$$(w_1, \dots, w_n) \sim (\lambda^{q_a^1} w_1, \dots, \lambda^{q_a^n} w_n), \quad (24)$$

где  $\lambda \in C^*$  и  $\sum_i q_a^i v_i = 0$ . Среди этих соотношений  $(n-3)$  независимы.

Чистое состояние кутрита образует 2-мерно-комплексное проективное компактное пространство  $CP^2$ , которое является двумерным примером веера, состоящего из трех одномерных конусов, порожденных векторами на плоскости  $R^2: v_1 = (1, 0)$ ,  $v_2 = (0, 1)$  и  $v_3 = (-1, -1)$ , и которым сопоставляются однородные комплексные координаты  $(w_1, w_2, w_3) \in C^3$ . Множество  $Z$  – точка  $\{0\}$ , поэтому торическое многообразие определяется

$$M = (C^3 \setminus \{0\}) / (C^*). \quad (25)$$

Из соотношения  $1(1, 0) + 1(0, 1) + 1(-1, -1) = (0, 0)$ , следует, что фактор  $C^*$  реализуется отношением эквивалентности  $(w_1, w_2, w_3) \sim \lambda(w_1, w_2, w_3)$ , совпадающим с обычным определением  $CP^2$ . Торическое многообразие  $M$  компактно тогда и только тогда, когда его веер заполняет  $N_R$  [6,7], что явно видно на примере построения веера  $CP^2$ -компактного двумерного комплексного проективного пространства, но оно еще не является Калаби-Яу.

В торическом многообразии существует естественный набор дивизоров, называемых торическими дивизорами. Пусть  $M_\Sigma$  торическое многообразие, описываемое веером  $\Sigma$  с ассоциированными однородными координатами  $w_i$  к каждому вектору  $v_i$ , порождающему одномерные конусы  $\Sigma$ . Торические дивизоры  $D_i$  многообразия  $M_\Sigma$  это гиперповерхности, определяемые уравнениями  $w_i = 0$ . Так как однородные координаты  $w_i$  соответствуют в веере  $\Sigma$  каждому одномерному конусу  $v_i$ , то можно считать, что сами вектора  $v_i$  соответствуют торическим делителям, определяемых как  $w_i = 0$ .

Теперь реализуем условие Калаби-Яу на трехмерных торических многообразиях. Хорошо известно [2-8], что с дивизором  $D = \sum_i a_i N_i$  можно ассоциировать линейное расслоение с мероморфным сечением так, что мероморфное сечение имеет нуль порядка  $a_i$  вдоль  $N_i$ , если  $a_i > 0$ , и полюс порядка  $-a_i$  вдоль  $N_i$ , если  $a_i < 0$ .  $N_i$  – неприводимые гиперповерхности, т.е. гиперповерхности, которые не могут рассматриваться как объединение двух гиперповерхностей. В торическом случае торические дивизоры  $D_i$ , опре-

деляемые равенством  $w_i = 0$ , являются неприводимыми гиперповерхностями. Используя приведенное выше соответствие, торический дивизор  $D_i$  можно связать с линейным расслоением  $O(D_i)$  с сечением  $s$ , которое имеет нуль первого порядка вдоль  $D_i$ ; таким образом, сечение  $s$  – это просто  $w_i$  и каждая однородная координата  $w_i$  – сечение линейного расслоения  $O(D_i)$ , ассоциированное с торическим дивизором  $D_i$ .

Более того, моном  $w_1^{a_1} \dots w_n^{a_n}$ , имеющий при  $a_i > 0$  нули порядка  $a_i$  вдоль  $D_i$ , а при  $a_i < 0$  имеющих полюсы порядка  $-a_i$  вдоль  $D_i$ , является сечением линейного расслоения  $O(\sum_i a_i D_i)$ . Рассмотрим случай  $a_i = \langle v_i, m \rangle$ ,  $i = 1, \dots, n$  для некоторого  $m \in M$ . При отношениях эквивалентности торического многообразия моном принимает вид [8]

$$\left( \lambda^{q_a^1} w_1 \right)^{\langle v_1, m \rangle} \dots \left( \lambda^{q_a^n} w_n \right)^{\langle v_n, m \rangle} = \lambda^{\left\langle \sum_{i=1, \dots, n} q_a^i v_i, m \right\rangle} w_1^{\langle v_1, m \rangle} \dots w_n^{\langle v_n, m \rangle} \quad (26)$$

Так как  $\sum_{i=1, \dots, n} q_a^i v_i = 0$ , этот моном инвариантен относительно отношений эквивалентности и, следовательно, это истинная мероморфная функция на нашем торическом многообразии.

Можно показать [8], используя методы, аналогичные для комплексных проективных пространств, что каноническое расслоение для торического Калаби-Яу многообразия  $M_\Sigma$  может быть задано формулой:

$$K_{M_\Sigma} = O(-\sum_i D_i) = 0 \quad (27)$$

Этот факт может определить, является ли торическое многообразие Калаби-Яу или нет. Из указанного условия следует, что прямые конструкции ведут к тому, что торические Калаби-Яу многообразия должны быть некомпактными. Это означает, что этот моном должен быть сечением тривиального линейного расслоения, т.е.

$$\Sigma_i \langle v_i, m \rangle D_i \sim 0 \text{ для любого } m \in M, \quad (28)$$

И наоборот, если  $\sum_i a_i D_i \sim 0$ , то существует  $m \in M$  такое, что  $a_i = \langle v_i, m \rangle$  для всех  $i$ .

Итак, кэлерово многообразие является Калаби-Яу тогда и только тогда, когда его канонический класс тривиален. Каноническое линейное расслоение торического многообразия  $M_\Sigma$  дается  $K_{M_\Sigma} \cong O(-\sum_i D_i)$ . Поэтому каноническое расслоение тривиально, если и только если  $\sum_{i=1}^n D_i = 0$ . Это условие эквивалентно существованию  $m \in M$  такого, что  $\langle v_i, m \rangle = 1$  для всех  $i$ , что приводит к следующему утверждению. Торическое многообразие  $M_\Sigma$ , определяемое веером  $\Sigma$ , является Калаби-Яу тогда и только тогда, когда все векторы  $v_i$ , образующие одномерные конусы  $M_\Sigma$ , лежат в той же аффинной гиперплоскости. Торическое Калаби-Яу многообразие некомпактно, если  $v_i$  лежат в гиперплоскости и не заполняют  $N_R$  и  $M_\Sigma$ . Это кажется серьезным ограниче-



## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

нием торической геометрии, поскольку в теории струн представляют огромный интерес именно компактные Калаби-Яу многообразия [2,8].

### 6. Компактные Калаби-Яу многообразия в квазиторических пространствах

Пути построения в торической геометрии компактных Калаби-Яу многообразий могут быть реализованы как гиперповерхности в компактных торических многообразиях на основе использования рефлексивных многогранников Батырева. В рамках торической геометрии можно кодировать свойства алгебраических многообразий в терминах вееров или многогранников, определенных на целочисленных решетках. В частности, это показал Батырев, условие Калаби-Яу для гиперповерхностей в торических многообразиях эквивалентно рефлексивности лежащего в основе метода Ньютоновского многогранника  $\Delta$ . Более того, дуальность рефлексивных многогранников соответствует зеркальной симметрии полученного класса многообразий Калаби-Яу. Это основная причина интереса к классификации 2-х, 3-х, 4-х мерных рефлексивных многогранников в контексте теории струн.

Известно, что общее число рефлексивных многогранников конечно в любой заданной размерности, потому что различные границы объема и количества точек были получены как функция размерности и числа внутренних узлов решетки.

Нас будет интересовать пара решеток  $M \simeq Z^n$  и  $N = \text{Hom}(M, Z) \simeq Z^n$  их вещественные расширения  $M_R \simeq R^n$  и  $N_R \simeq R^n$ . Многогранник  $\Delta \subset M_R$  называется решетчатый (или целочисленным) многогранником, если его вершины лежат в  $M$ . Рассматриваемый многогранник  $\Delta \subset R^n$  обладает «свойством внутренней точки», то есть начальная точка  $\{0\} \in R^n$  находится внутри  $\Delta$ . Для любого множества  $\Delta \subset M_R$  дуальное (или полярное) множество  $\Delta^* \subset N_R = M_R^*$  определяется выражением:

$$\Delta^* = \{y \in N_R : \langle y, x \rangle \geq -1 \forall x \in \Delta\}, \quad (29)$$

где  $\langle y, x \rangle$  – дуальная пара  $y \in N_R$  и  $x \in M_R$ .

Если многогранник  $\Delta$  со свойством внутренней точки  $\{0\} \in R^n$ , то  $\Delta^*$  также является многогранником со свойством  $\{0\} \in R^n$  и  $(\Delta^*)^* = \Delta$ . Решетчатый многогранник  $\Delta \subset M_R$  называется рефлексивным, если его дуальный  $\Delta^* \subset N_R$  является решеточным многогранником с решеткой  $N$ , дуальной к  $M$ .

Из таких многогранников можно построить комплексные многообразия следующим простым способом: Проводят лучи  $v_i$  через вершины (или, в более общем случае, через узлы решетки)

$\Delta^*$  и вводят однородную координату  $z_i$  для каждого луча  $v_i$  аналогично построению проективного пространства. Далее нужно найти полный набор линейных соотношений типа  $\sum_i q_i v_i = 0$  среди векторов решетки, определяющих эти лучи, и для каждого такого линейного отношения вводится мультипликативное отношение эквивалентности  $z_i \simeq \lambda^{q_i} z_i$  среди однородных координат.

Это легче всего представить на примере: для рефлексивной пары (рисунк 2), лучи, соответствующие вершинам  $\Delta^*$  удовлетворяют соотношению  $2v_x + 3v_y + v_z = 0$ , так что описанное таким образом пространство и есть взвешенное проективное пространство, определяемое как множество классов эквивалентности в  $C^3 \setminus \{0\}$  относительно соотношения  $(x, y, z) \simeq (\lambda^2 x, \lambda^3 y, \lambda z)$ . Нетрудно видеть, что это пространство содержит сингулярности в точках  $y=z=0$  и  $x=z=0$ . В алгебраической геометрии есть процедура превращения такого сингулярного пространства в гладкое, называемое «раздутием» сингулярностей. В торическом подходе, эту операцию очень легко выполнить: она просто соответствует добавлению дополнительных лучей к торической диаграмме; в данном примере это просто лучи, проходящие через узлы решетки внутри  $\Delta^*$ .

Для определения гиперповерхностей в торических многообразиях необходимо иметь уравнения, которые согласованы с отношениями эквивалентности между торическими координатами. В случае гиперповерхности Калаби-Яу, эти однородные уравнения особенно просты. С точки зрения лучи  $v_i$ , соответствующие координатам  $z_i$  и точки решетки  $w$  многогранника  $\Delta$ , определяют гиперповерхность Калаби-Яу:

$$P(z_1, \dots, z_K) = \sum_{w \in \Delta \cap M} a_w \prod_{k=1}^K z_k^{\langle v_k, w \rangle + 1}, \quad (30)$$

где каждая точка решетки  $\Delta$  определяет моном в  $P$ .

Для нашего примера, который приводит к одномерной гиперповерхности Калаби-Яу, представляющая собой не что иное, как эллиптическую кривую, соответствующие мономы указаны на рисунке 2. В контексте многогранников зеркальная симметрия проявляется как замена  $(M, \Delta)$  и  $(N, \Delta^*)$ .

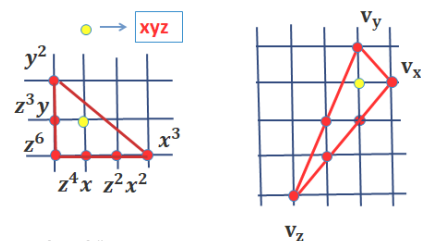


Рис. 2.  $\Delta$  и  $\Delta^*$  для взвешенного проективного пространства  $CP^2(1,2,3)$

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Основная идея схем классификации Калаби-Яу пространств состоит в том, чтобы строить для каждой размерности всевозможные наборы рефлексивных многогранников, так, чтобы каждый рефлексивный многогранник являлся подполиэдром одного из многогранников этого множества [11,12]. В [11] был предложен универсальный алгебраический путь построения весовых рефлексивных проективных векторов всех размерностей, которым отвечают рефлексивные многогранники. Классификация соответствующих весовых систем приводит к конечному множеству  $n$ -арных ( $n=1,2,3,\dots$ ) представлений рефлексивных векторов, соответствующих конечной цепочке рефлексивных многогранников с единой внутренней структурой рефлексивных подмногогранников на уровне, соответствующем  $n$ -арити – законам композиции алгебры  $n=2,3,4,\dots$  [11].

Теперь можно обсудить классификацию рефлексивных многогранников Калаби-Яу многообразий, являющиеся гиперповерхностями в торических многообразиях. Точки решетки рефлексивного многогранника кодируют мономы, встречающиеся в описании гиперповерхности в многообразии  $V_\Sigma$ , веер которого определяется триангуляцией дуального многогранника  $\Delta^*$ .

С данным веером в  $N_R$  можно ассоциировать глобальную однородную систему координат для  $V_\Sigma$  аналогично обычной конструкции  $P^n$ . Для этого каждому одномерному конусу в  $\Sigma$  присваивается координата  $z_k$ ,  $k=1,\dots,K$ . Если примитивные образующие  $v_1,\dots,v_K$  этих одномерных конусов охватывают  $N_R$ , то должно быть  $(K-n)$  независимых линейных соотношений  $\sum_k q_j^k v_k = 0$ . Эти линейные отношения используются для определения соотношений эквивалентности

$$(z_1, \dots, z_K) \sim (\lambda^{q_j^1} z_1, \dots, \lambda^{q_j^K} z_K), j=1, \dots, K-n$$

на пространстве  $C^K \setminus Z_\Sigma$ . Множество  $Z$  определяется веером следующим образом: объединение пространств  $\{(z_1, \dots, z_K) : z_i = 0 \forall i \in I\}$ , где множествами индексов  $I$  являются те множества, для которых  $\{v_i : i \in I\}$  не принадлежит конусу в  $\Sigma$ . Таким образом,

$$(C^*)^K \subset C^K \setminus Z_\Sigma \subset C^K \setminus \{0\}.$$

Затем  $V_\Sigma = (C^K \setminus Z_\Sigma) / ((C^*)^{(K-n)} \times G)$ , где  $K-n$  копий  $C^*$  действуют в силу соотношений эквивалентности данных выше, конечная абелева группа  $G$  является фактором решетки  $N$  по решетке сгенерированной  $v_k$ . Обычно мы будем рассматривать случай, когда  $G$  тривиальна. В этом подходе торические дивизоры  $D_k$  определяются уравнениями  $z_k=0$ . Построение гиперповерхности Калаби-Яу по рефлексивному многограннику происходит в следующем образом:

выбирается рефлексивный многогранник  $\Delta$  в  $M_R$ ,  $\Delta^* \subset N_R$  дуальный ему, а веер  $\Sigma$  определяется максимальной триангуляцией  $\Delta^*$ . Это означает, что целые образующие  $v_1, \dots, v_K$  одномерные конусы – это просто целые точки (кроме начала координат). Полином в  $\Delta^*$ , обращение в нуль которого определяет гиперповерхность Калаби-Яу, имеет вид (30). Рефлексивность многогранника обеспечивается тем, что показатели степеней в (30) неотрицательны. Для  $n \leq 4$  общие  $(n-1)$ -мерные гиперповерхности Калаби-Яу в семействе, определяемом формулой (30), будут гладкими. При  $n \geq 5$  многообразие Калаби-Яу может иметь особенности, не допускающие крепантно-го раздутия [9].

### 7. Бинарные и тернарные представления алгебры рефлексивных проективных весов для КЗ-пространства

В случае КЗ-пространства, классификацию рефлексивных проективных весов в соответствии с законом композиции алгебры надо исходить из пяти типов проективных рефлексивных векторов  $k_1=(1)$ ,  $k_2=(1,1)$ ,  $k_3=(1,1,1)$ ,  $(1,1,2)$ ,  $(1,2,3)$  и их всевозможных расширений нулевыми компонентами до векторов размерности 4 [11]. Полный список 95-ти проективных рефлексивных весов КЗ можно получить из мультипликативной алгебры, в которой используются все законы композиции [11]. В данном случае – это бинарные, тернарные, кватернарные, применяемые для всего множества пяти указанных расширенных векторов, всего 50 расширенных векторов. Используя алгебру только бинарную композицию всевозможных пар этих 50 расширенных векторов, мы получаем 90 различных  $\sim k_4$  векторов в 22 двойных представлениях, в которых фигурируют 13 старших векторов, часть из них является старшими для нескольких представлений, как видно из *таблицы 1*. Используя тернарную композицию алгебры и комбинируя всевозможные три расширенных вектора в нашем множестве, мы получаем 91 различных векторов, из которых только четыре  $\sim k_4$  вектора отличаются от 90 векторов, найденных ранее. В результате использования в алгебре бинарной и тернарной композиций остался только один вектор  $\sim k_4=(7,8,9,12)$ , который имеет только одну точку пересечения отрезка прямой. Следуя рецепту, представленному в качестве центральной теоремы в [11], в таблице перечислены все проективные векторы  $\sim k_4$ , полученные из пар расширенных векторов меньшей размерности, которые попадают в перечисленные 22 представления. В каждом случае мы перечисляем максимальные целые числа  $m, n$  в представлении

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ях, которые определяются размерностями расширенных векторов. Эти бинарные представления включают все 90 проективных  $\sim k_4$  векторов, найденных с помощью нашей конструкции.

Для иллюстрации в *таблице 1* приведены старшие векторы в каждом представлении, т.е. первые члены из всех 22 представлений алгебры рефлексивных проективных весов  $mk_i^{\text{ext}} + nk_j^{\text{ext}}$ , для которых  $m=1, n=1$ . Как видно, некоторые векторы являются общими для нескольких представлений. Используя наше понимание происхождения пересечений и дуальности, можно классифицировать эти 22 цепи по пяти классам, которые соответствуют пересечениям, как указано в *таблице 1*.

Однако следует отметить, что описанная выше двукратно расширенная векторная структура не исчерпывает полный список возможных проективных векторов КЗ. Проективные векторы  $k_4 = (4,5,7,9), (5,6,8,11), (5,7,8,20), (7,8,10,25), (7,8,9,12)$  не имеют пересечений плоских рефлексивных многогранников и поэтому не попали в список (см. *таблицу 2*) Для получения в нашей алгебре полного списка возможных до-

полнительных  $k_4$ -векторов необходимо рассматривать тернарные (и выше) представления, построенные композицией трех расширенных вектора типа  $\sim k_{\text{ex}} = (0,0,1)$  и  $\sim k_{\text{ex}} = (0,1,1)$  со всеми возможными перестановками, имеющие в пересечении многогранник-отрезок, состоящий из трех целых точек.

**Примеры торических расслоений КЗ со структурой Вейерштрасса.** Можно рассмотреть следующее представление алгебры из 12 проективных  $k_4$ -векторов с эллиптическим слоем:  $k_4 = \mathbb{C}P^3(1,1,4,6)$  [12],  $(1,2,6,9)$  [18],  $\mathbb{C}P^3(1,3,8,12)$  [24],  $\mathbb{C}P^3(1,4,10,15)$  [30],  $\mathbb{C}P^3(1,5,12,16)$  [36],  $\mathbb{C}P^3(1,6,14,21)$  [42],  $\mathbb{C}P^3(2,3,10,15)$  [30],  $\mathbb{C}P^3(2,5,14,21)$  [42],  $\mathbb{C}P^3(3,4,14,21)$  [42],  $\mathbb{C}P^3(3,5,16,24)$  [48],  $\mathbb{C}P^3(4,5,18,27)$  [54],  $\mathbb{C}P^3(5,6,22,33)$  [66].

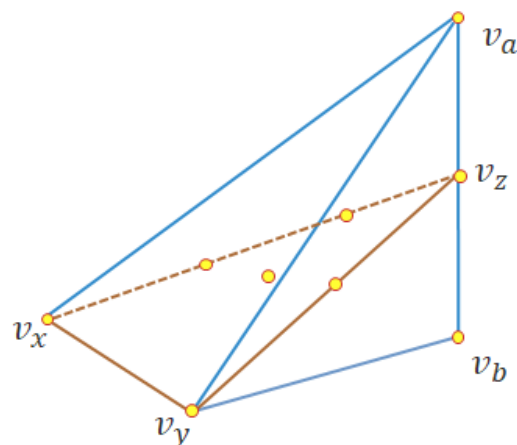
В этом представлении зеркальные многогранники  $\Delta^*$  имеют плоскость пересечения  $H^*$  слоя через внутреннюю точку, которая определяет треугольник эллиптического слоя с семью целыми решеточными точками,  $\mathbb{C}P^2(1,2,3)$ :  $\Delta_{\text{слой}}^* = \Delta^* \cap H_{\text{слой}}^*$ . По зеркальной симметрии рефлексивный многогранник  $\Delta$  также состоит из семи точек, поэтому он самодуален. Также можно найти плоское пересечение  $H$  через внутреннюю точку, которое также порождает рефлексивный многогранник с семью точками, а именно слой  $\mathbb{C}P^2(1,2,3)$  [6] (см. *рисунок 3*):  $\Delta_{\text{слой}} = \Delta \cap H_{\text{слой}}$ .

Некоторые особенности, в частности эллиптические, соответствуют Кодаира классификации простых групп Ли [11,12], а калибровочные группы с непертурбативным расширением соответствуют возникновению групп Ли ADE типа [13]. Таким образом, важные геометрические свойства проявляются благодаря структурам расслоения и сингулярностям слоев. Оба типа структур проявляют себя простыми спосо-

**Таблица 1**

Представлена структура 22 представлений с их старшими 13- векторами рефлексивной проективной алгебры:  $k_{\text{ст}} = k_i^{(0)} \cup k_j^{(0)}$ . Заметим, что некоторые вектора в силу своей богатой внутренней структуры стали старшими векторами нескольких представлений алгебры

$N_c$	$k_i^{(0)} \cap k_j^{(0)}$	$\Delta_i \Delta_j^*$	$k_{\text{ст}}$	$(\Delta, \Delta^*)$	$d$
1	(0001)∩(1110)	(10,4)	(1111)	(35,5)	4
2	(0111)∩(1011)	(10,4)	(1122)	(30,6)	6
3	(0111)∩(3012)	(4,10)	(1233)	(23,8)	9
4	(0001)∩(1120)	(9,5)	(1112)	(34,6)	5
5	(0011)∩(1102)	(9,5)	(1113)	(35,5)	6
6	(0112)∩(1012)	(9,5)	(1124)	(34,6)	8
7	(0112)∩(2110)	(9,5)	(1111)	(35,5)	8
8	(0112)∩(1120)	(5,9)	(1223)	(24,8)	8
9	(0112)∩(2103)	(5,9)	(1225)	(28,8)	10
10	(0011)∩(1100)	(9,5)	(1111)	(35,5)	4
11	(0011)∩(1101)	(9,5)	(1112)	(34,6)	5
12	(0123)∩(3210)	(5,9)	(1111)	(35,5)	4
13	(0111)∩(1012)	(8,6)	(1123)	(31,8)	7
14	(0112)∩(2130)	(6,8)	(1112)	(34,6)	5
15	(0001)∩(1230)	(7,7)	(1123)	(31,8)	7
16	(0011)∩(1203)	(7,7)	(1124)	(35,7)	6
17	(0111)∩(1023)	(7,7)	(1134)	(33,9)	9
18	(0112)∩(1023)	(7,7)	(1135)	(36,9)	10
19	(0123)∩(1023)	(7,7)	(1146)	(39,9)	12
20	(0123)∩(2103)	(7,7)	(1113)	(39,6)	12
21	(0123)∩(3120)	(7,7)	(2334)	(15,9)	12
22	(0123)∩(3210)	(5,9)	(1111)	(35,5)	5



**Рис. 3.** Многогранник  $\Delta^*$ , соответствующий гладкой эллиптически расслоенной КЗ-поверхности

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

бами в контексте рефлексивных многогранников. Многообразие имеет структуру расслоения, если существует проекция на некоторое другое многообразие, называемое базовым многообразием, и если прообраз общей точки базы при этой проекции изоморфен другому многообразию, являющимся слоем. В терминах рефлексивных многогранников слой соответствует рефлексивному подмногограннику  $\Delta_{\text{слой}}^* \subset \Delta_{\text{полное}}^*$  в линейном подпространстве  $N_{R,\text{слой}} \subset N_R$  содержащее 0. Базовое пространство – это просто торическое многообразие, веер которого (т.е. набор лучей и некоторое другие данные) есть проекция полного веера на подпространство  $N_{R,\text{слой}}$ . В качестве примера смотри рисунок 3.

На рисунке 3 показан веер гладкой эллиптически расслоенной поверхности КЗ, при этом слой определяется треугольником Вейерштрасса  $v_x v_y v_z$  с 7-решеточными точками, включая одну внутреннюю точку. Эллиптический слой соответствует рефлексивному проективному самодуальному вектору  $k_s = (1, 2, 3)$  [6]  $(\Delta(k_s), \Delta^*(k_s)) = (7, 7)$

(см. таблицу 1). Торическая диаграмма базового пространства  $CP^1$  определяется проектированием вдоль плоскости треугольника. Это отрезок изоморфный  $v_s v_t$ . Сингулярности ADE-типа особенно изящно проявляются в терминах рефлексивных многогранников: как было замечено в [8,13], аффинные диаграммы калибровочных групп ADE-типа можно увидеть в многогранниках, соответствующих раздутиях сингулярного пространства.

### Литература

1. Шафаревич И.Р. Основы алгебраической геометрии. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: МЦНМО, 2007.
2. Данилов В.И. Алгебраические многообразия и схемы <http://lib.mexmat.ru/books/2865>. С.221-240.
3. J.P. Brasselet, Introduction to toric varieties / Workshop on «The geometry and topology of Singularities», Cuernavaca (2007).
4. Волков Г.Г., Смуров С.В., Царьков А.Н. Многомерные комплексные проективные про-

**Таблица 2**

Представлены 95 КЗ- рефлексивных проективных векторов (весов), 90 из которых входят в 22- бинарных представления алгебры. Синим цветом помечены 12 старших векторов этих представлений. Красным цветом помечены 4- рефлексивные вектора, которые вошли в 4- тернарные представления. Фиолетовым цветом помечен единственный исключительный вектор, который соответствует многограннику, не имеющий никакой внутренней структуры кроме одной точки

1	(1,1,1)[4]	13	(1,2,3,4)[10]	25	(1,3,5,6)[15]	37	(1,5,7,13)[26]
2	(1,1,1,2)[5]	14	(1,2,3,5)[11]	26	(1,3,5,9)[18]	38	(1,5,12,18)[36]
3	(1,1,1,3)[6]	15	(1,2,3,6)[12]	27	(1,3,7,10)[21]	39	(1,6,8,9)[24]
4	(1,1,2,2)[6]	16	(1,2,4,5)[12]	28	(1,3,7,11)[22]	40	(1,6,8,15)[30]
5	(1,1,2,3)[7]	17	(1,2,4,7)[14]	29	(1,3,8,12)[24]	41	(1,6,14,21)[42]
6	(1,1,2,4)[8]	18	(1,2,5,7)[15]	30	(1,4,5,6)[16]	42	(2,2,3,5)[12]
7	(1,1,3,4)[9]	19	(1,2,5,8)[16]	31	(1,4,5,10)[20]	43	(2,2,3,7)[14]
8	(1,1,3,5)[10]	20	(1,2,6,9)[18]	32	(1,4,6,7)[18]	44	(2,3,3,4)[12]
9	(1,1,4,6)[12]	21	(1,3,3,4)[12]	33	(1,4,6,11)[22]	45	(2,3,4,5)[14]
10	(1,2,2,3)[8]	22	(1,3,4,5)[13]	34	(1,4,9,14)[28]	46	(1,5,7,13)[26]
11	(1,2,2,5)[10]	23	(1,3,4,7)[15]	35	(1,4,10,15)[30]	47	(1,5,7,13)[26]
12	(1,2,3,3)[9]	24	(1,3,4,8)[16]	36	(1,5,7,8)[21]	48	(1,5,7,13)[26]
49	(2,3,5,7)[17]	61	(2,5,9,11)[27]	73	(3,4,10,17)[34]	85	(4,5,13,22)[44]
50	(2,3,5,8)[18]	62	(2,5,9,16)[32]	74	(3,4,11,18)[36]	86	(4,5,18,27)[54]
51	(2,3,5,10)[20]	63	(2,5,14,21)[42]	75	(3,4,14,21)[42]	87	(4,6,7,11)[28]
52	(2,1,2,2)[6]	64	(2,6,7,15)[30]	76	(3,5,6,7)[21]	88	(4,6,7,17)[34]
53	(2,1,2,3)[7]	65	(3,3,4,5)[15]	77	(3,5,11,14)[33]	89	(5,6,7,9)[27]
54	(2,3,8,11)[24]	66	(3,4,5,6)[18]	78	(3,5,11,19)[38]	90	(5,6,8,11)[30]
55	(2,3,8,15)[28]	67	(3,4,5,7)[19]	79	(3,5,16,24)[48]	91	(5,6,8,19)[38]
56	(2,3,10,15)[30]	68	(3,4,5,8)[20]	80	(3,6,7,8)[24]	92	(5,6,22,33)[66]
57	(2,4,5,9)[20]	69	(3,4,5,12)[24]	81	(4,5,6,9)[24]	93	(5,7,8,20)[40]
58	(2,4,5,11)[22]	70	(3,4,7,10)[24]	82	(4,5,6,15)[30]	94	(7,8,10,25)[50]
59	(2,5,6,7)[20]	71	(3,4,7,14)[28]	83	(4,5,7,9)[25]	95	(7,8,9,12)[36]
60	(2,5,6,13)[18]	72	(3,4,10,13)[30]	84	(4,5,7,16)[32]	x	



# ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

УДК 004.8.004.9

## НАСТОЯЩИЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ВОЕННОМ ДЕЛЕ: DEEP LEARNING + DEEP UNDERSTANDING

## REAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MILITARY AFFAIRS: DEEP LEARNING + DEEP UNDERSTANDING

**Игорь Александрович Бугаков**

*заслуженный изобретатель РФ*

*почетный работник науки и техники РФ*

*доктор технических наук, профессор*

член Научного совета при Президиуме РАН

по методологии искусственного интеллекта и

когнитивных исследований

вице-президент по инновационным проектам АНО «ИИФ»

Адрес: 142210 Московская обл.,

г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Тел.: +7(4967) 35-31-93

E-mail: iabugakov@iifmail.ru

### Аннотация

В статье излагаются концептуальные идеи по обоснованию направления создания «настоящего» (обладающего пониманием) искусственного интеллекта на основе объединения возможностей современного машинного глубокого обучения (Deep Learning – DL) на основе статистики с глубоким пониманием (Deep Understanding – DU) на основе незаслуженно забытого модернизированного символического описания, что позволяет минимизировать риски и максимизировать эффективность применения искусственного интеллекта в военном деле.

**Ключевые слова:** интеллект, естественный интеллект, искусственный интеллект, настоящий интеллект, понимающий искусственный интеллект, глубокое обучение, глубокое понимание, автономность, модель мира, военное дело, эффективность.

### Summary

The article presents conceptual ideas for justifying the direction of creating a «real» (with understanding) artificial intelligence based on combining the capabilities of modern machine deep learning (Deep Learning – DL) based on statistics with deep understanding (Deep Understanding – DU) based on the undeservedly forgotten modernized symbolic descriptions, which allows minimizing risks and maximizing the effectiveness of the use of artificial intelligence in military affairs.

**Keywords:** intelligence, natural intelligence, artificial intelligence, real intelligence understanding artificial intelligence, deep learning, deep understanding, autonomy, world model, military science, efficiency.

Стратегический путь развития вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) – автономизация на основе искусственного интеллекта (ИИ). Оператор систем дистанционного управления ВВСТ сегодня становится «слабым» звеном, поскольку в современных условиях ведения боевых действий возможны подавление радиоканала управления, перехват управления, подмена передаваемой информации. Оператор имеет недопустимо высокую для современного боя инерционность поведения вследствие природной ограниченности быстродействия человека и удаленности от места событий, не способен в режиме реального времени прово-

дить анализ большого объема сенсорной информации, подвержен стереотипам и эмоциям, на качество принимаемых им решений влияет его психофизиологическое состояние.

Однако на пути автономизации ВВСТ справедливо стоит проблема САС – «смертоносных автономных систем». Можно ли делегировать технике право на самостоятельное принятие решения об уничтожении человека? Общественное мнение настроено против такого делегирования, справедливо принимая во внимание не только морально-этическую сторону вопроса (робот убивает человека?), но и опасность совершения роботом грубых ошибок, которые ни-

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

когда бы не допустил нормальный человек. Но можно ли решить «проблему САС» путем запрета? Даже при подписании большинством стран договора о полном запрете на разработку, испытания, производство, приобретение и передачу САС или, в более «мягком» варианте, о разрешении вести только ограниченную (насколько?) и контролируруемую (кем?) разработку, производство и применение доверенных (как убедить-ся?) систем есть большая вероятность того, что подписавшие договор страны с большой вероятностью будут вести «теневую» разработку таких систем, а тем более – страны, отказавшиеся от каких-либо ограничений по разработке и применению САС. Ведь в отличие от создания ядерного, химического или бактериологического оружия создание САС не требует наличия специальных уникальных материальных компонентов. И если даже по климату (ограничениям по выбросам углекислого газа) пока нет единства, то как можно быть уверенным в соблюдении договорных обязательств применительно к разработкам, которые практически невозможно проконтролировать, боевых САС теми, кто, причисляя себя к «признанным» мировым лидерам, несущим миру «демократию», рассуждает сегодня о нарушениях Россией «мирового порядка» (что это за «порядок», кем и как он устанавливается, думаю, объяснять не надо). К тому же следует учесть уже известные случаи применения за рубежом боевых, предназначенных для поражения человека, автономных средств. Так как быть? Думается, что в этих условиях, к сожалению, путь у нас может быть только один – как можно более быстрое (своевременное!) создание настоящего (понимающего) ИИ, количество совершаемых ошибок которым и, главное, их последствий было бы менее ошибок и последствий действий человека, а эффективность в целом – выше.

Уже сегодня можно говорить о таких преимуществах ИИ перед человеком как:

- отсутствие ограничений по размерам и энергопотреблению;
- большая вычислительная мощность, способность параллельной обработки огромного объема разнородной информации;
- возможность объединения в единую (иерархически-сетевую) эффективную систему многих ИИ;
- практическое «бессмертие» отдельного ИИ, способность неограниченно тиражировать накопленный им опыт;
- возможность иметь значительно более развитые и дополненные «органы чувств» (сенсоры) носителя ИИ;

- тело носителя ИИ и его органы действия, способные совершать работу в материальном мире, могут быть любого размера и любой удобной для выполнения специализированных задач формы;

- применение роботов с ИИ возможно в условиях, нахождение человека в которых несовместимо с его жизнью;

- способность действовать в рамках строго определенных правил, неподверженность при принятии решений эмоциям (страх, ненависть,...), усталости, личным пристрастиям;

- способность на основе функционального подхода («функционализм») эффективно решать частные многие полезные практические задачи, не соблюдая природное требование соответствия уровней развития интеллекта и тела.

Проблема только в том, что современный ИИ (то, что к нему относят) не понимает (в общепринятом смысле) того, что делает, и потому является ненастоящим!!! Как следствие – недостатки и опасности современного «ненастоящего» («непонимающего») ИИ, ограничивающие (в критически важных случаях – исключают) его применение в военном деле. Для искусственных нейронных сетей (ИНС) это:

- необходимость для обучения ИИ иметь репрезентативную выборку большого объема, что не всегда возможно (как по объему, так и по качеству);

- обязательность наличия мощных вычислительных ресурсов для обработки большого объема данных при решении сложных задач, что возможно, как правило, только в стационарных условиях;

- способность ИИ грубо ошибаться, в том числе и из-за «чрезмерной интерпретации» и плохой обработки пограничных случаев;

- легкость целенаправленного обмана ИИ (в частности, посредством «отравления» данных для первичного обучения);

- непредсказуемость путей достижения и несоответствие результата поставленной цели как следствие отсутствия у ИИ «здорового смысла»;

- непрозрачность – невозможность объяснить (понять человеком) основания принятия ИИ того или иного решения. Следствие – недоверие к решениям ИИ, опасность использования ИИ в ответственных случаях;

- катастрофическая забывчивость, когда обучение новому ведет к забыванию прежнего опыта, невозможность в большинстве случаев в процессе функционирования улучшать полученный при первичном обучении «опыт» на основе новых примеров;

- отсутствие у ИИ эффективной (для своих ус-

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

ловий применения), достаточно жесткой и слабоуязвимой (для внешних атак) генетической составляющей;

- возможность злонамеренного использования ИИ с последствиями, сопоставимыми с последствиями применения оружия массового поражения;

- сложность контроля развития самообучающегося ИИ. Опасность неконтрольного саморазвития ИИ, особенно в случае появления групп («видов») ИИ, объединенных общностью происхождения, выполняемых задач, сформировавшихся «интересов».

Понимание – процесс (и результат) встраивания воспринимаемого в модель мира воспринимающего». Процесс понимания связан с оперированием значениями и смыслами, причинами и следствиями. Обладать (знать, хранить в памяти) ≠ понимать. Существует неосознанное автоматическое понимание известного (осознается понимание нового, в случае познания расширяющего (изменяющего, корректирующего) модель мира понимающего. Можно говорить о понимании правильном и неправильном, исходя из внутренней (личной) и внешней (сторонней) оценки на основе вероятностного прогнозирования как функция полноты используемой модели мира («проблема скрепки» как пример неправильного понимания). Глубина понимания определяется глубиной правильного (логичного, органичного) встраивания воспринимаемого в модель мира (полное непонимание... частичное понимание..., углубленное понимание..., полное (глубокое) понимание). Глубокое понимание – логически непротиворечивое встраивание воспринимаемого в используемую пространственно-временную модель мира на всех ее иерархических уровнях, соответствующее подтвержденному общепринятому («текущей истине») – глубокое понимание известного или непротиворечиво и доказательно развивающее общепринятое с расширением (уточнением) модели мира и формированием новой «текущей истины» – глубокое понимание неизвестного (нового)<sup>1</sup>. Науке пока(?) непонятна сущность процесса порождения физическими воздействиями психических ощущений, непонятно, как кодируются ощущения и как они объединяются в восприятие. Но корреляция мозговых сигналов и психических образов, наличие волевого управление физиологическими процессами) свидетельствует о наличии материальной составляю-

щей (всей или части?) психического. Проблема в том, что психика, образно говоря, есть программа с закрытым исходным кодом.

Понимание – обязательное качество ЕИ и основная проблема создания настоящего ИИ (НИИ) – понимающего ИИ. Учитывая, что психическое понимание рождается на основе приема физических сенсорных сигналов, а реальный мир (во всяком случае, каким он нам представляется) – иерархически-сетевой, несложно предположить о существовании различных, иерархически связанных уровней понимания. Так что то, что демонстрируют нам сегодня ИНС, весьма условно, но все же можно отнести к «пониманию», конечно же, не конечному, в чем нас пытается убедить Курцвейл[6]<sup>2</sup>, а только к первичному, к его нижнему уровню. Это уровень физического, поверхностного (начального) «понимания» ИИ (мир – паттерны нейронной активности, «здесь» и «сейчас», а понимание – статистическое определение их принадлежности тому или иному множеству). Самый верхний уровень – уровень психического, глубокого осознанного понимания человека (модель мира – иерархически-сетевая простирающаяся в пространстве-времени субъективная реальность с имеющими значение и смысл объектами, с причинно-следственными и ассоциативными связями и своим местом в ней). Промежуточные уровни - составляющие этой модели. Применительно к глубокому обучению это означает, что «понимать» (в рамках своей части модели мира) должен каждый иерархический уровень (слой) ИНС.

Учитывая, что бессознательное взрослого человека способно автономно и правильно воспринимать мир, понимая его одновременно на многих уровнях своей модели, принимая решения и реализуя их (слепозрение, гипноз,...), и формировать творческие решения (инсайт) сознательно поставленных задач (т.е. способность творить, генетически задана?!), а ребенок до 3-х лет не осознает себя, но успешно развивается, познает мир, формируя его модели, то можно сделать вывод о том, что наличие сознания непосредственно для понимания в рамках используемой модели мира во многих случаях не является обязательным!

Путь создания НИИ один – углубление понимания ИИ как основы восприятия и предвидения посредством объединения возможностей машинного глубокого обучения и модернизированного классического символического описания (в

<sup>1</sup> Ситуация с «глубоким обучением» в ИИ весьма странная с позиций ЕИ. Можно ли применительно к ЕИ говорить о глубоком (!) обучении, не связывая его с глубоким пониманием? Идея «глубины» это исключает

<sup>2</sup> Курцвейл Р. Эволюция разума, 2015. С. 13.



## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

последнее время в печати об этом говорят как о нейросимвольном ИИ) с построением и развитием иерархически-сетевой пространственно-временной фило-онтогенетической модели мира с категоризацией, причинно-следственными и ассоциативными связями, целесообразностью, символьным описанием и языковым выражением. Этот путь назван нами как путь «From «Deep learning (DL)» to «Deep understanding (DU)» (от Глубокого обучения) – ГО к «Глубокому пониманию» – ГП [1,2]).

Применительно к естественному интеллекту (ЕИ) справедливы следующие утверждения, которые целесообразно учитывать при создании НИИ [1-4,7-11]:

- глобальная цель носителя интеллекта – выживание посредством совершения действий;

- интеллект – «сверхалгоритм по порождению алгоритмов», объединяющий филогенетический (особая роль!) и онтогенетический опыт;

- уровень развития и возможности ЕИ определяются полнотой используемой пространственно-временной модели мира с причинно-следственными и ассоциативными связями;

- основная операция ЕИ – распознавание, основное предназначение – предвидение (распознавание будущего). Глубина предвидения – глубина интеллекта (управлять – значит предвидеть);

- ЕИ развивается через понимающие, пополняющие опыт, действия;

- сознание – «прожектор» внимания, инструмент интеллекта для преодоления ограничений эволюционного усложнения, формирования алгоритмов поведения (автоматизмов).

Одним из основных принципов формирования, функционирования и развития НИИ является принцип минимальности (ПМ) как обобщение идеи «экономии» действия как физического движения на любые природные (в т.ч. ментальные) процессы как условия их осуществления и(или) эволюционного сохранения: «Все происходящее в природе «стремится» к минимизации расхода основных природных ресурсов: энергии  $E$ , пространства (объема)  $V$ , времени  $T$  на свое осуществление». Действительность (в нашем сознании!) как пространство  $D=E \times V \times T$ , создаваемое базисом  $e, v, t$ , где  $e$  – квант энергии,  $v$  – квант объема,  $t$  – квант времени. К проявлениям-следствиям ПМ следует отнести [1-4,7-11]:

- базисность как универсальный способ формирования общего из частного (целого из отдельного), порождения нового из старого (обобщенный ряд Фурье (ОРФ) как универсальная модель целого);

- полярность как следствие диапазонности

(квантованности) существования объектов и проявления их качеств в пространстве-времени;

- опору на накопленный опыт (Байес);

- пороговость взаимодействия и скачкообразность развития;

- иерархически-сетевую структурированность и модульность;

- пространственно-временную интеграцию и дифференциацию;

- фрактальность, рекурсивность, инвариантность, мультимодальность;

- однородность и пластичность, ассоциативность, подражание (имитация);

- «самоорганизацию» как природный автоматизм, терминальность;

- динамическое восприятие (градиент, производная) с приоритетом крутизны сигнала;

- сочетание филогенетической грубой и онтогенетической тонкой настройки с эволюционным повышением роли онтогенеза;

- универсальность технологии интеллектуализации живых организмов (генетическая предзаданность тела и мозга под цели существования в своей среде обитания, образование (воспитание + обучение), непрерывность пополнение опыта («повышение квалификации»).

- самоконтролируемость обучения. Обучение в природе (само- или с учителем) осуществляется с применением самоконтроля, реализуемого с использованием филогенетического и пополняемого онтогенетического опыта, и направлено на увеличение шансов на выживание. Все известные в машинном обучении виды обучения («с учителем», «без учителя», «с подкреплением»,...) всегда есть «обучение с двумя учителями»: внешним (учители – субъект и (или) среда обитания) и внутренним (учитель – организм обучающегося с его фило- и онтогенетическими опытом).

- обязательность наличия рефлексивных действий (генетически заданных рефлексов), автоматизмов (сформированы и отработаны в процессе обучения будущей «профессии» с их совершенствованием в процессе реального применения по назначению), адаптивных действий в соответствии с генетически заложенными и сформированными в процессе функционирования продукциями («если..., то...»), оперативных интегральных способов оценки происходящего с требуемой настройкой организма (в том числе посредством различных «чувств», «эмоций»).

Интеллект – интегральное проявление целостной психики, генетически предзаданная метапрограмма, формирующая и развивающая модель мира, обеспечивающая выживание и развитие ее носителя, свойство способного к автономному поведению в реальной или вирту-

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

альной среде объекта на основе генетического и постоянно пополняемого в процессе жизни (обучения) индивидуального опыта достоверно и все более глубоко предвидеть будущее, планировать и реализовывать целенаправленное поведение с созданием новых успешных стратегий и алгоритмов.

Некоторые идеи для правильного движения от «ГО» к «ГП» [1-4,7-11]:

- обязательность наличия «психики» с иерархически-сетевой моделью мира как совокупностью объектов, отношений, значений и смыслов с генетически заданной базисной видовой составляющей, постепенно раскрывающейся в среде обитания носителя ИИ после его «рождения» («оживления»);

- динамическое (пространственно-временное), мультимодальное, прогностическое, инвариантное, ассоциативное, корреляционное, причинно-следственное, ..., восприятие;

- обучение значениям и смыслам через действия с самоконтролем на немаркированных данных;

- ускоренное образование (обучение и воспитание) в среде себе подобных;

- структура, форма – основа (*in-forma-tion*: информация – то, что в форме [3]);

- структура языка [5] как отображение структуры мозга;

- сочетание жестких генетических и гибких онтогенетических нейронных структур. Мозг как ЛИС<sup>3</sup> (генетика) + ПЛИС<sup>4</sup> (личный опыт);

- одновременность участия нейронов в различных нейронных структурах. Синхронизация и ритмы как механизмы интеграции;

- избыточность одинаковых структур для выполнения одинаковой функции как условие обеспечения надежности и быстрого статистического усреднения;

- опыт как множество инстинктов, рефлексов, автоматизмов;

- внимание как интеграция цели, состояния, потребностей, возможностей.

- приращения и весовые коэффициенты вместо абсолютных значений и базисных функций (ОРФ, векторное квантование, ...);

- вероятностное прогнозирование (Байес), «недоопределенная» математика (Нариньяни), нечеткая логика (Заде).

Некоторые направления применения настоящего ИИ в военном деле:

- групповое применение наземных и (или) воздушных роботов с ИИ на принципах само-

организации с сопровождением группы минимально-достаточным количеством операторов (в частности, двумя: основным и запасным): разведка, охрана, поражение, ...;

- виртуальные полигоны для обучения: личного состава, операторов, моделей ИИ, ...;

- прямая и обратная задачи описания сцен (разведка, принятие решения на поле боя и в других экстремальных ситуациях);

- самоорганизующиеся высокоживучие системы обработки больших массивов данных (при потере части элементов система автоматически перестраивается в оптимальную структуру) – информационно-разведывательных, логистических, ..., статистических в разных пространственно-временных масштабах с различных театров военных действий, объединением информации различных родов и видов войск для принятия решений (в том числе – стратегических): прогнозирование, управление войсками, оптимальное целераспределение, контроль электромагнитного пространства и оценка радиоэлектронной обстановки, радиоэлектронная разведка, радиоэлектронная борьба, дополнительное описание деталей и общей сцены с различных точек зрения.

- контроль космического и околоземного пространства, наблюдение за объектами на поверхности Земли из космоса с целью оперативного управления войсками и оружием, перенацеливанием ракет в полете с учетом изменяющейся текущей обстановки;

- интеллектуальные («умные») боеприпасы (в том числе – групповые), способные самостоятельно в процессе полета реализовывать адаптивное, не заложенное в программу в виде алгоритма, поведение;

- интеллектуальные системы охраны, исключаяющие наличие «слабого звена» (человека-оператора) из процесса контроля, восприятия, интерпретации (но с сохранением, на первом этапе, группы быстрого реагирования);

- интеллектуальные системы защиты информации (обнаружение скрытых каналов утечки информации, непрерывной (не мешающей основной работе) аутентификации пользователей, ...);

- обеспечение доверия к ПО, системам с ИИ.

В заключение – несколько слов о «сильном», «слабом», «узком», «прикладном», «общем» и др. ИИ. Такое деление, частично оправданное в метафоричном плане, в научном нецелесообразно. Дж. Сирл разделил ИИ на «сильный ИИ»

<sup>3</sup> ЛИС – логическая интегральная схема.

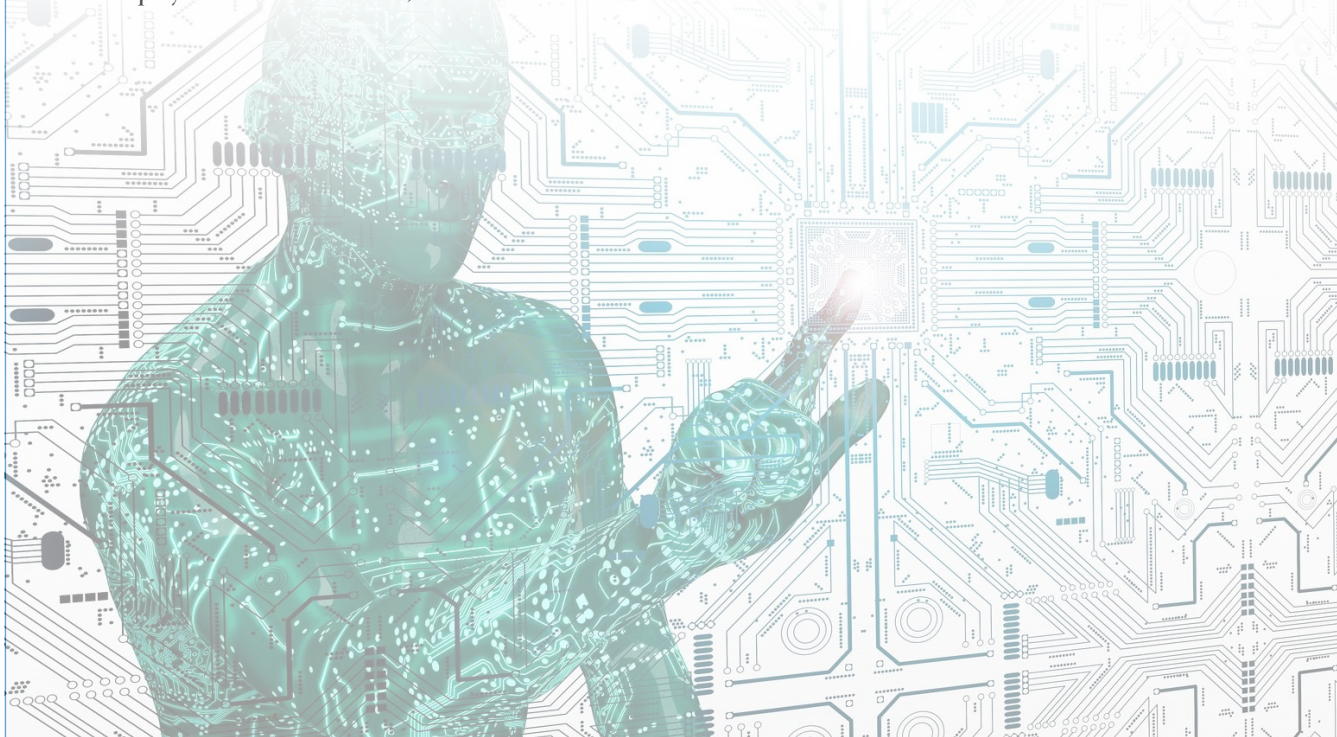
<sup>4</sup> ПЛИС – программируемая ЛИС.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

и «слабый ИИ» для отделения компьютерных программ как полезных средств при изучении разума («слабый ИИ») от оперирующих символами компьютерных программ, способных пройти тест Тьюринга («сильный ИИ») и, как следствие, показа абсурдности вывода о том, что разум есть компьютерная программа. Приписывание интеллекта только человеку ошибочно. Интеллектом обладает большинство животных, у каждого из которых он всегда полный, общий, сильный, достаточный для выживания в своей среде обитания. «Узкого» интеллекта в природе не бывает. Опора на вычислительную мощь в рамках «узкого ИИ» полезна и достаточна при решении простых задач. Но при решении сложных, даже «узких» интеллектуальных задач ее недостаточно. Любое живое существо, решая частные задачи своего существования, опирается на свой «общий» интеллект, на формируемый им «здоровый смысл» (вида и индивида), но полную модель мира. Применение словосочетаний «сильный ИИ» и «слабый ИИ» допустимо для сравнения интеллектов представителей разных видов, а также отдельных индивидов одного вида.

### Литература

1. Бугаков И.А. От глубокого обучения к глубокому пониманию (From Deep Learning to Deep understanding) // Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.95-102.
2. Бугаков И.А., Царьков А.Н. Настоящий искусственный интеллект: методологические основания. Серпухов: МОУ «ИИФ», 2020. 418 с.
3. Бугаков И.А. Информация: появление, существование, восприятие // Датчики и системы, 2001. №2. С.41-47. Ч.1; 2001. №3. С.61-68. Ч.2.
4. Бугаков И.А. Обобщенный ряд Фурье как универсальный образ действия // Сборник трудов XXV Межрегиональной научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». Ч.2. Серпухов, 2006. С.261-267.
5. Хомский Н.О природе и языке: Пер. с англ. М.: КомКнига, 2005. 288с.
6. Курцвейл Р. Эволюция разума: Пер. с англ. М.: Издательство «Э», 2015. 352с.
7. Бугаков И.А. Принцип минимальности и деятельность мозга // Сб. научных трудов юбилейного симпозиума, посвященного 150-летию издания статьи И.М. Сеченова «Рефлексы головного мозга». М.: ИИнтеЛЛ, 2013. С.252-275.
8. Бугаков И.А. Царьков А.Н. Базовая универсальная технология интеллектуализации ВВСТ: концептуальные идеи // Известия Института инженерной физики, 2015. №2(36). С.65-72.
9. Бугаков И.А., Царьков А.Н. О когнитивном моделировании, искусственном интеллекте и психике роботов // Известия Института инженерной физики, 2018. №2(48). С.100-105.
10. Бугаков И.А. Принцип минимальности и категоризация в естественном и искусственном интеллекте // Экстремальная робототехника и конверсионные тенденции. Труды Международной научно-технической конференции. СПб.: 2018. С.380-385.
11. Бугаков И.А. Как создать дружелюбный искусственный интеллект // Известия Института инженерной физики, 2019. №4(54). С.116-121.



УДК 623.626: 004.056.5

### ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННО- ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ УГРОЗ (ВОЗДЕЙСТВИЙ) НА ЛИЧНЫЙ СОСТАВ ВС РФ

### GENERALIZED MODEL OF INFORMATION-PSYCHOLOGICAL THREATS (IMPACTS) ON PERSONNEL OF THE RF ARMED FORCES

**Владимир Кузьмич Новиков**

кандидат военных наук, доцент  
доцент кафедры  
ВА РВСН им. Петра Великого  
Адрес: 143900, Московская обл.,  
г Балашиха, ул. Карбышева, д. 8  
Тел.: 8 (495) 524-07-39  
E-mail: varvsn@mil.ru

**Иван Сергеевич Рекунов**

кандидат технических наук  
докторант кафедры  
ВА РВСН им. Петра Великого

**Михаил Геннадьевич Краснов**

кандидат педагогических наук  
старший научный сотрудник  
ВА РВСН им. Петра Великого

#### Аннотация

В статье рассматривается обобщенная модель информационно-психологических угроз (воздействий) на личный состав РВСН и источников (внутренних и внешних) их применения.

**Ключевые слова:** информационно-психологическое воздействие, источники применения средств, технологий и веществ информационно-психологических угроз (воздействий), личный состав.

#### Summary

The article considers a generalized model of information-psychological threats (impacts) on the personnel of the Strategic Missile Forces and sources (internal and external) of their application.

**Keywords:** information-psychological impact, sources of application of means, technologies and substances of information-psychological threats (impacts), personnel.

Средства, технологии и вещества информационных воздействий представляют в настоящее время большую опасность для личного состава объединений, соединений, частей и организаций РВСН (далее – личный состав) целью управления их поведением в нужном направлении для противника (инострannого государства).

Для оценивания эффективности применения средств, технологий и веществ деструктивных (негативных) информационно-психологических воздействий на личный состав со стороны иностранных государств (противника) в ходе оценки информационной обстановки при ведении информационного противоборства рассмотрим **обобщенную модель** применения средств, технологий и веществ информационно-психологических воздействий на психику личного состава РВСН и источников (внутренних и внешних) их применения.

В интересах понимания сути обобщенной модели раскроем ряд понятий таких как «личный состав», «сознание», «подсознание», «ощущение», «органы чувств (ощущений) человека», «тело человека», «внутренние органы человека», «информативные признаки человека (людей)», «техническая компьютерная разведка (киберслежка)», «информационно-психологическое воздействие», «источники применения средств, технологий и веществ информационно-психологических воздействий».

**Личный состав РВСН** включает военнослужащих и лиц гражданского персонала (федеральных государственных гражданских служащих и работников) РВСН [1].

**Сознание** – способность идеального воспроизведения действительности в мышлении [2].

**Подсознание (бессознательное)** – совокупность психических процессов, актов и состояний, обусловленных явлениями действительности

сти, во влиянии которых субъект не отдает себе отчета [4].

**Ощущение** – отражение отдельных свойств объективной реальности, возникающие в результате воздействия их на органы чувств и возбуждения нервных центров головного мозга [2,4].

**Органы чувств (ощущений) человека** – специализированная периферическая анатомо-физиологическая система, обеспечивающая, благодаря своим рецепторам, получение и первичный анализ информации из окружающего мира и от других органов самого организма, то есть из внешней среды и внутренней среды организма.

К органам чувств (ощущений) человека относятся: слух, зрение, обоняние, осязание, вкус, равновесие, висцеральные органы.

**Тело человека** – физическая структура человека, человеческий организм. В теле человека различают голову, шею, туловище, верхние и нижние конечности [4].

**Внутренние органы человека** – обеспечивают функционирование жизненно важных систем человеческого организма, обеспечивающие обменные процессы с внешней средой и выполняющие растительные функции (питание, дыхание, выделение, размножение) [3].

**Информативные признаки личного состава** – признаки физиологического, психического и социального его (их) состояния, после восприятия, обработки и их анализа можно принять решение на применение средств, технологий и веществ (оружия) информационно-психологических воздействий на и/или принять меры (провести мероприятия) по его (их) защите [5].

**Техническая компьютерная разведка (киберслежка)** – средства, технологии и системы получения (добывания) информативных признаков о человеке (людях), в том числе личном составе, а также технические и программные закладки, позволяющие несанкционированно добывать (собирать), обрабатывать и передать информативные признаки о человеке (людях), в том числе личном составе заинтересованным лицам, для их последующего использования ими в управлении человеком (людьми), в том числе личным составом в нужном направлении [5].

**Информационно-психологическое воздействие** – целенаправленное воздействие на психику человека (людей), осуществляемое с применением информационно-психологических средств, технологий и веществ с целью управления (склонения) его (их) к нужному поведению или гибели.

**Средства, технологии и вещества информационно-психологического воздействия (оружие)** – совокупность специальных средств, технологий и веществ скрытого и насильствен-

ного воздействия на человека (людей) с целью управления его (их) поведением (деятельностью), в нужном для воздействующей стороны направлении или уничтожение (гибели) человека (людей).

К информационно-психологическим средствам, технологиям и веществам относятся: как MASS-MEDIA – средства массовой информации; виртуальные информационно-психологические средства и технологии; энергоинформационные психологические средства и технологии-средства радиоэлектронной борьбы; психотропно-информационные средства и технологии; биоэнергоинформационные средства; информационно-генетические средства; соматропно-психоинформационные средства и технологии; электронные (виртуальные) деньги; технология флешмоб (внезапная толпа); нейролингвистическое воздействие (программирование).

**Источники применения средств, технологий и веществ информационно-психологических угроз (воздействий) на информационно-психологические объекты** – субъект (-ы) (человек, люди) имеющий (-ие) возможность преднамеренно и скрытно применять средства, технологии и вещества информационно-психологических воздействий **опасных** для информационных объектов (человека, людей) в интересах иностранного государства или личных целях, а также быть сами лично источниками информационно-психологических воздействий.

К внутренним источникам применения средств, технологий и веществ информационно-психологических угроз (воздействий) можно отнести: террористические и экстремистские организации и их членов; радикальные общественные объединения и группировки и их членов; членов неправительственных организаций; мигранта (-ов); иностранных рабочих; иностранных граждан; лиц без гражданства; национальные диаспоры и их членов; секты и их адептов; хакера (-ов); наркомана (-ов); организованные преступные группировки и их членов; неадекватных и завербованных граждан; пранкера (-ов); хейтера (-ов); сотрудника (ов) детективных агентств; частного детектива; журналиста (-ов) российских негосударственных СМИ; работника (-ов) и (сотрудника (-ов)) магазинов, киосков и компаний Интернет-торговли; работника (-ов) и членов закрытых клубов; работника (-ов) кинотеатров; членов открытых и закрытых внутренних виртуальных социальных сообществ (объединений); владельца (-ев) закрытых сайтов внутренних социальных сетей; блоггера (-ов); членов общественных фондов; иностранного (-ых) студента (-ов); представителей иностранных языковых школ; коллаборационистов; сотрудника (-ов) коллекторных агентств; членов оппозиционных партий, движений; маргиналь-

## НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ♦ НАУЧНЫЕ РЕЦЕНЗИИ ♦ ОТЗЫВЫ

ные группы и их членов; лиц с двойным гражданством; лиц без гражданства; артистов российской эстрады, знаменитых писателей, известных журналистов, предпринимателей; кладмена (-ов); нетсталкера (-ов); членов сообществ без определенного статуса; членов общественных организаций; участников общественных движений; граждан органа общественной самостоятельности; сотовых авторитетов в социальных сетях; сепаратиста (-ов); представителей фейк (ложных) онлайн-магазинов; хипстера (-ов); хайпбиста (-ов) («hypebeast»); якка (-ов) (Young Urban Creatives); молодого (-ы) человека (людей) ни-ни (NEET); нфоцыганина (-н); скинхеда (-ов) («Skin-head» – англ., досл. «кожаная голова»); скулшутера (ов); мистических практиков (оккультных фигур); миллениала (-ов) (millennium – тысячелетие); человека (людей) «тренинг» («тренинги»); лудомана (-ов); (гэмблинга (-ов)); детей по «обмену» – будущих лидеров; мажора (-ов) (золотая молодежь); метросексуала (-ов) («мачо»); яппа (-ов); сноба (-ов); фейктиста (-ов); прекариатиста (-ов); консьюмеризматиста (-ов); людей (человека) АУЕ («арестантский уклад един»); симулякра (-ов); политтехнолога (-ов); сексуальные меньшинства; шпиона (-ов); актора (-ов); топ-менеджера (-ов); геймера (-ов) (англ. gamer – игрок); скимера (-ов); тиктокера (-ов);

гедониста (-ов) (др.-греч. δονή «наслаждение, удовольствие»); хайпжора (-ов); спойлера (-ов); ланцепупа (-ов); фаббера (ов); интернет активиста (-ов); мобильные молодежные группы; антиваксера (-ов); людей отказывающихся от части своего тела; луказмита (-ов); эйблизмата (-ов); аватара (-ов); интернет-аддиктора (-ов), диссидента (-ов), спящие террористические ячейки, спящие террористы одиночки и др.

К внешним источникам применения средств и технологий информационных воздействий можно отнести: подразделения информационной войны; диверсионно-разведывательные формирования и десанты иностранных государств; иррегулярные вооруженные формирования; специальные службы иностранных государств; сотрудников частных военных компаний иностранных государств; инспекционные группы иностранных государств и их членов; международного (-ых) хакера (-ов), действующих с территории иностранных государств; пранкера (-ов), действующие с территории иностранных государств; хейтера (-ов) иностранных государств; членов открытых и закрытых международных виртуальных социальных сообществ (объединений); работников (членов) международных компаний Интернет-торговли; владельцев закрытых международных (иностраннх)



Рис. 1. Обобщенная модель информационно-психологических воздействий на психику личного состава ВС РФ в ходе ведения информационных войн

сайтов социальных сетей; журналистов международных (иностранных) СМИ; международных (иностранных) туристов; сотрудников международных (иностранных) фондов; иностранных мигрантов; иностранного (-ых) блогера (-ов); сотрудника (-ов) посольства (-в) иностранных государств; сотрудника (-ов) консульств иностранных государств; представителя (-ей) иностранных государств в государственных органах власти, представителя (-ей) иностранных государств в бизнесе; членов международных волонтерских организаций в районах вооруженных конфликтов и нестабильности, иностранных (-ого) граждан (-а).

С учетом вышеприведенного **обобщенная модель** применения средств, технологий и веществ информационно-психологических воздействий на психику личного состава ВС РФ с целью управления их поведением в нужном направлении для иностранного государства (противника) для достижения поставленных целей – политических, экономических, территориальных, военных и иных в ходе подготовки и ведения информационных войн (*рисунком 1*) позволяющая представить и оценить:

- процессы по добыванию, с помощью технической компьютерной разведки (киберслежки) информативных признаков личного состава, их сбору, анализу, изучению, обобщению и принятия решения на использование;

- органы ощущений (зрения, слуха, обоняния, осязания, вкуса, равновесия, висцеральные), тело и внутренние органы личного состава, на которые осуществляется информационно-психологическое воздействие и далее на сознание и подсознание;

- принятия решений на применение источниками (внутренними и внешними) информаци-

онно-психологических средств, технологий и веществ (оружия) по воздействию на органы ощущения, тело и внутренние органы личного состава с целью управления ими в нужном направлении для противника (иностранного государства) на основе полученных информативных признаков;

- принятие адекватных правовых, организационных, технических, политико-воспитательных, медицинских и иных мер по защите личного состава от информационно-психологических средств, технологий и веществ и источников их применения. Рис. 1. Обобщенная модель информационно-психологических воздействий на психику личного состава ВС РФ в ходе ведения информационных войн

Таким образом, предложенная обобщенная модель информационно-психологических воздействий на психику личного состава ВС РФ в ходе ведения информационных войн позволит более эффективно оценивать меры по защите личного состава объединений, соединений, частей и организаций ВС РФ.

### Литература

1. Федеральный закон от 31.05.1996 №61-ФЗ «Об обороне».
2. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. 4-е изд. М.: Сов. энциклопедия, 1989. 1632 с.
3. <https://anatomiaomului.usmf.md/wp-content/blogs.dir/68/files/sites/68/2014/09/Общая-спланхнология.pdf>
4. Интернет-ресурсы.
5. Новиков В.К., Краснов М.Г., Рекунков И.С. Средства, технологии, системы и технические каналы утечки информации для осуществления киберслежки за человеком и его деятельностью. М.: Горячая линия-Телеком, 2021. 160 с.



## СОБЫТИЯ

### АНО «ИИФ» – В КЫРГЫЗСТАНЕ

В конце июля Институт инженерной физики представил Серпухов и Московскую область на Первой Международной промышленной выставке «EXPO-RUSSIA» в республике Кыргызстан и Бишкекском бизнес-форуме.

Во время работы выставки и бизнес-форума заключен ряд соглашений о сотрудничестве между АНО «ИИФ» и ОЮЛ «Ассоциация АЮ Холдинг», MDN Group LTD, ОсОО «СМК Статус Строй Сервис», Международная школа Медицины НОУ УНПК «Международный университет Кыргызстана».



В рамках Бишкекского бизнес-форума Президент АНО «ИИФ» А.Н. Царьков выступил на круглом столе «Медицина в городе и в удаленной местности – новые тенденции и перспективы развития» с докладом на тему: «ТАМЕРОН как высокотехнологичный препарат для лечения и профилактики различных заболеваний иммуносупрессивной этиологии». На круглом столе обсуждались вопросы сотрудничества России и Кыргызстана в фармацевтической отрасли. ТАМЕРОН как препарат, обладающий широким спектром действия, заинтересовал киргизских врачей, и в скором времени будут налажены поставки препарата в Кыргызстан.

На круглом столе «Международное сотрудничество в развитии систем жизнеобеспечения: водо-, тепло- и энергоснабжение, переработка отходов, охрана окружающей среды» с докладом на тему: «Инновационная технология предотвращения пожаров и уникальное производство» об автономных устройствах пожаротушения «Огнеборец» выступил инженер-конструктор АО «Фортис» А.З. Иванов.



Вице-президент Института О.Н. Андрух принял участие в международной научно-практической конференции «Университеты – новые международные центры притяжения бизнеса, образования и дипломатии», которая прошла в рамках Бишкекского бизнес-форума в Кыргызском экономическом университете.

По итогам Первой международной промышленной выставки «EXPO-RUSSIA KYRGYZSTAN 2022» и Бишкекского бизнес-форума АНО «ИИФ» награждена дипломами за участие, АО «НПО «ОТПДИ» получило диплом «За разработку и производство активных систем тепловой защиты человека на основе электрообогрева», АО «Столетика» – «За разработку и создание ЛП ТАМЕРОН», АО «Фортис» «За разработку и создание автономных устройств пожаротушения «Огнеборец».

Для ИИФ участие в выставке и бизнес-форуме стало уникальной возможностью наладить сотрудничество с коллегами из Кыргызстана и других стран-участниц форума в разных областях: медицине, образовании, производстве систем безопасности и поддержания жизнеобеспечения в экстремальных условиях, а также продвижению высокотехнологичной продукции Института на рынок Кыргызстана.







**Afanasiev Andrey A.** Doctor of Technical Sciences, associate professor, employee. Federal state military educational institution of higher education «Academy of the Federal security service of the Russian Federation». Orel, Priborostroitelnaia str., 35.

**Alliluyeva Natalia V.** Support specialist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

**Ananyev Vitaly E.** Head of the Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

**Atakischev Oleg I.** Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor. Deputy General Director for Special Projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

**Belikhin Evgeny N.** Candidate of Technical Sciences, Senior Engineer of the Educational Laboratory of the All-Russian Military Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, st. Zhdanovskaya, 13.

**Budjakov Alexander V.** Employee. Federal state military educational institution of higher education «Academy of the Federal security service of the Russian Federation». Orel, Priborostroitelnaia str., 35.

**Bugakov Igor A.** Honoured devisor of Russia. Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, professor. Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

**Burmistrov Vladimir V.** Candidate of Technical Sciences. Lector or department of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, st. Zhdanovskaya, 13.

**Chernousov Maxim S.** Adjunct. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Chernykh Julia S.** Senior lecturer of Siberian state university of telecommunications and information science. Novosibirsk, st. Kirova, 86.

**Churinov Vitaly V.** Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

**Churinova Olesya V.** Student. Bauman Moscow State Technical University. Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5-1.

**Dezhina Elena V.** Senior lecturer of Siberian state university of telecommunications and information science. Novosibirsk, st. Kirova, 86.

**Efimako Andrey I.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

**Egorov Vladislav V.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

**Gribunin Vadim G.** Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation. Doctor of Technical Science. Associate Professor. Chief Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

**Kolombet Valeriy A.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 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

**Korobkov Alexey A.** Honorary worker of science and high technology of the Russian Federation. Candidate of Technical Sciences, associate Professor, head of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Udarny l., 1a.

**Krasnov Mikhail G.** Candidate of Pedagogical Sciences. Senior Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

**Kryzhanovsky Vladimir I.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of On-board information and Measurement Systems. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, st. Zhdanovskaya, 13.

**Kvashennikov Vladislav V.** Doctor of Technical Sciences. Leading Researcher. JSC «Kaluga Research Institute of Telemechanical Devices». Kaluga, ul. K. Marx, 4.

**Labaznikov Andrey P.** Officer.

**Lesnykh Vadim N.** Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Lubko Alexander Y.** Candidate of Technical Sciences. Employee. Federal state military educational institution of higher education «Academy of the Federal security service of the Russian Federation». Orel, Priborostroitelnaia str., 35.

**Luchin Andrei V.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor. Deputy head of department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Makarov Mihail M.** Candidate of Technical Sciences. Head of laboratory – senior researcher of laboratory of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, st. Zhdanovskaya, 13.



**Mazin Anatoly V.** Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of «Information Security». Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Mukhin Anatoly I.** Candidate of Technical Sciences, lecturer. Military Space Academy A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Nakonechny Andrey B.** Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Novikov Vladimir K.** Candidate of Military Sciences. Associate Professor. Associate Professor of the Department. Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

**Obynochny Igor A.** Candidate of Pedagogical Sciences. Associate Professor. Head of the Educational and Methodological Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Orekhov Sergey E.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor. Head of department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Orlovskiy Vladimir M. Adjunct.** Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Panchelyuga Victor A.** Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Senior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Pavlenko Dmitry P.** Lecturer of the 55-th department. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Piskulin Igor V.** Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Popov Vladimir A.** Graduate student. Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

**Potapov Sergei E.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department. Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

**Pushkareva Elena Yu.** Doctor of Technical Sciences, professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Rekunkov Ivan S.** Candidate of Technical Sciences. Doctoral student of the department. Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.

**Remizov Sergey L.** Candidate of Technical Sciences. Senior lecturer of Siberian state university of telecommunications and information science. Novosibirsk, st. Kirova, 86.

**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.

**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.

**Suvorov Gennady P.** Candidate of Technical Sciences.

**Tkachenko Alexey L.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Informatics and Information Technologies. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Kaluga State University K.E. Tsiolkovsky. Kaluga, st. Stepan Razin, 26

**Tonkov Alexey S.** Cadet. Military Space Academy A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Trofimov Ilya A.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Onboard information and Measurement Systems. Military Space Academy A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

**Usik Boris A.** Candidate of Technical Sciences, associate professor. Associate Professor of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Vershinin Vladislav E.** Graduate student. Kaluga Branch of Bauman MSTU. Kaluga, St. Bazhenova, 2.

**Volkov Gennadiy G.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences. Professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**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 Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Zelenevsky Yury V.** Doctor of Technical Sciences, associate professor. Researcher. Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.



## 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»

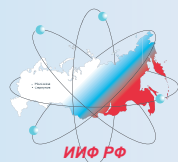
##### Постоянные рубрики

- **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., Lesnykh V.N., Kolombet V.A.**

On coincidence of periods spectrum in fluctuations of various nature processes with the spectra of some astrophysical systems ..... 2

**Zakharov V.L., Smirnov D.V., Burmistrov V.V., Makarov M.M.**

On the question of the possibility of using the method of an approximate corrective operator when pointing a service spacecraft in the conditions of abnormal operation of the propulsion system ..... 7

**Usik B.A., Luchin A.V., Obynochnyy I.A.**

Selection of parameters for diagnosing converter devices with redundant elements by pattern recognition methods ..... 12

### **RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION**

**Zelenevsky V.V., Chernousov M.S., Zelenevsky Y.V., Egorov V.V., Nakonechny A.B.**

Efficiency of data encoding methods in radio communication systems ..... 15

**Atakishchev O.I., Mukhin A.I., Belikhin E.N., Tonkov A.S.**

Radiomonitoring method for evaluation of aircraft flow on airways to ensure safe aircraft traffic ..... 20

**Atakishchev O.I., Belikhin E.N., Mukhin A.I., Pavlenko D.P.**

Investigation of the accuracy of operation of the orbital group of observations of space objects by the triangulation method ..... 24

**Afanasyev A.A., Lubko A.Y., Budjakov A.V.**

Use of band sampling at quadrature signal processing in receiving modules of radio monitoring channels ..... 28

**Remizov S.L., Dezhina E.V., Chernykh J.S.**

Comparative analysis of methods for identifying the transfer function of a discrete circuit ..... 31

**Orekhov S.E., Orlovskiy V.M.**

Increasing the throughput of a promising integrated special-purpose control system based on the method of functional binary information compression ..... 36

### **INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT**

**Zakharov V.L., Smirnov D.V., Trofimov I.A., Kryzhanovskiy V.I.**

Dual-loop tracking system of a specialized spacecraft for pointing an optoelectronic device at space object ..... 40

**Kvashennikov V.V.**

Efficient image encoding in information transmission and processing systems ..... 48

**Vershinin V.E.**

Developing recurrent convolutional neuronet model for text sentiment analysis ..... 54

**Mazin A.V., Tkachenko A.L.**

Simulation of the distribution of dopants in a semiconductor at various temperatures and times during thermal diffusion ..... 58

**Churinov V.V., Efimako A.I., Churina O.V.**

Quality assessment of personnel allowed to operation of potentially hazardous facilities ..... 62

**Suvorov G.P., Smirnov D.V., Korobkov A.A., Alliluyeva N.V.**

Video monitoring and passenger flow analysis system based on artificial intelligence methods and convolutional neural networks with Python implementation ..... 67

**Pushkareva E.Y., Piskulin I.V.**

Kinematic and dynamic models of the automatic motion control system for a robotic complex ..... 75

**Atakishchev O.I., Gribunin V.G., Ananyev V.E., Labaznikov A.P.**

The methods and algorithms of continuous authentication of the operator based on the analysis of his actions with a mouse-type manipulator ..... 79

**Potapov S.E., Popov V.A., Kondrashin A.E.**

Using a collection of electronic texts to improve the accuracy of document classification in a special-purpose information system ..... 86

**Smurov S.V., Volkov G.G.**

Features of the quantum vacuum geometry in bundles of affine and toric projective spaces ..... 90

### **ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS**

**Bugakov I.A.**

Real artificial intelligence in military affairs: Deep Learning + Deep Understanding ..... 100

### **SCIENTIFIC REVIEWS • SCIENTIFIC CRITIQUES • COMMENTS**

**Novikov V.K., Rekunkov I.S., Krasnov M.G.**

Generalized model of information-psychological threats (impacts) on personnel of the RF Armed Forces ..... 106

**EVENTS** ..... 110

**AUTHORS** ..... 111

**THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS** ..... 113

**REQUIREMENTS TO AUTHORS** ..... 114

Учредитель и издатель – АНО «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 АНО «ИИФ». Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.

Подписано в печать 3.08.2022.

Дата выхода в свет 10.08.2022. Тираж 2000 экз. Цена свободная.

© Автономная некоммерческая организация «Институт инженерной физики», 2022.



Автономная  
некоммерческая  
организация

«Институт  
инженерной  
физики»

(АНО «ИИФ»)

142210, Московская обл., г. о. Серпухов, г. Серпухов, Большой Ударный переулоч, д. 1а, стр. 1

<http://www.iifrf.ru> e-mail: [info@iifmail.ru](mailto:info@iifmail.ru)

Тел.: +7(4967) 35-31-93, 35-13-71 факс: +7(4967) 35-44-20 моб.: +7 (499) 400-05-75