№4 2020 +0 [58]

научно-технический журнал

# Известия

## ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ

## ИННОВАЦИИ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

## ОТ РАЗРАБОТКИ ДО ВНЕДРЕНИЯ

Межрегиональное общественное учреждение
“Институт инженерной физики”
(научное, образовательное и производственное учреждение)

## В НОМЕРЕ


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

2 **Алаторцев А.И., Голов Д.Ю.**
Моделирование показателей надежности отдельных узлов ракетных систем при различных законах распределения прочности и напряжения

5 **Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В.**
Трипликатор как механизм формирования универсальной системы утраивающихся периодов

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

11 **Квашенников В.В., Бугаков И.А., Кузин А.В.**
Оценивание вероятностей приема помехоустойчивого кода в каналах с независимыми и группирующимися ошибками

17 **Ерунов А.А., Леванов Д.В., Севостьянов А.С.**
Способ организации разноприоритетного доступа в групповом скрытом канале с переменной скоростью передачи

21 **Цветков К.Ю., Шадрин А.Г., Абазина Е.С., Рыженков В.А.**
Применение технологий цифровой стеганографии в интересах обеспечения устойчивости систем управления

26 **Косяк А.И., Шиманов С.Н., Донцов Д.В.**
Передача запросов в режиме двойного использования запросного канала по алгоритму тактированного случайного множественного доступа (стратегия 2)

31 **Зеленевский В.В., Черноусов М.С., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В.**
Метод оценки помехоустойчивости цифровых систем передачи с кодовым уплотнением данных при воздействии стационарных помех

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

37 **Гусеница Я.Н., Мишуков О.А., Оркин В.В., Коробков А.А.**
Методика распознавания маневрирующих космических аппаратов на основе нейросетевой классификации радиолокационных изображений

44 **Каширина О.Ю., Каширина Е.И., Кулаков В.В., Мурашов А.Г., Шаманов В.А.**
Состояние и основные направления развития оружия, экипировки и средств связи боевых пловцов

51 **Атакищев О.И., Титенко Е.А., Фролов С.Н., Щитов А.Н., Бекетов И.Н., Бекетов А.Н.**
Математическая модель определения местоположения наноспутника формата CUBESAT

57 **Бут Г.С., Синицын С.В.**
Математическая модель процесса аккумулирования тепловой энергии

62 **Абрамова Т.В., Буйневич И.А., Титенко Е.А., Халин Ю.А.**
Метод и алгоритм средневзвешенного нечёткого ранжирования и кластеризации инновационных проектов

73 **Мартынова И.А.**
Теоретико-функциональный анализ функций преобразования информационно-криптографических систем

78 **Мартынов А.П., Мартынова И.А., Николаев Д.Б., Сплюхин Д.В.**
Соответствия, отображения и образы элементов информационных систем

84 **Волков Г.Г., Смуров С.В., Царьков А.Н.**
Многомерные комплексные проективные пространства в квантовой физике и квантовой информации

### ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

95 **Халикова К.С., Маврина И.А.**
Обучение курсантов военно-технического вуза инженерной графике: противоречия

### НАУКОМЕТРИЯ

98 **Емелин Н.М.**
Экспертиза рецензируемых журналов: зачем она нужна

101 **AUTHORS**

103 **ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

104 **ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ**


Научно-технический журнал

**ИЗВЕСТИЯ**
**Института инженерной физики**
№4 (58) 2020

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально

**ISSN 2073-8110**

Включен в «Перечень ВАК»
по научным специальностям:
05.11.16. Информационно-измерительные и управляющие системы
05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации
05.13.19. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

Главный редактор,
председатель редакционного совета
и редакционной коллегии

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

научно-технический журнал
Известия
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ
№ 4 2020
58

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

**Владимир Владимирович Зеленевский**
*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, доцент*

**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*

## Алексей Николаевич Царьков

Президент Института –
Председатель Правления Института
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
почетный гражданин г. Серпухова

Дорогие друзья!
От имени коллектива Института инженерной физики и от себя лично поздравляю вас с наступающими праздниками -
Новым Годом и Рождеством Христовым!

Уходящий 2020 год стал для Института инженерной физики и всех нас годом серьезных испытаний. Нам пришлось учиться жить и работать в новых непростых условиях. В связи со сложной эпидемиологической обстановкой не все задуманное удалось реализовать, но вместе с тем мы с честью выдержали все испытания, которые легли на нас и наши семьи, и главный итог – мы выстояли, смогли адаптироваться к новым социально-экономическим условиям, не снизили темпы научной и производственной деятельности.

Итогом и высокой оценкой профессионализма и ответственного отношения к делу коллектива нашего Института стал целый ряд достижений. В марте Институт включен в Реестр единственных поставщиков российского вооружения и военной техники, а в апреле вошел в Перечень системообразующих предприятий Московской области и России.

В ходе работы Международного военно-технического форума «Армия-2020» Министр обороны Российской Федерации Сергей Кужугетович Шойгу посетил экспозицию Института и дал высокую оценку инновационным разработкам наших ученых в области навигации, связи и систем электрообогрева.

Выдающихся успехов достигли молодые ученые Института, многие из которых были удостоены стипендии Правительства Российской Федерации, званий «Инженер года», «Лучший по профессии» и других наград.

Несмотря на ограничительные меры, Институт в течение года принял активное участие более чем в 20 различных крупных мероприятиях, в том числе в работе пяти международных форумов. По итогам года Институт награжден девятью дипломами, грамотами и сертификатами, шестью специальными призами и кубками.

Важнейшим итогом нашей деятельности стало успешное завершение государственной экспертизы и получение регистрационного удостоверения на активную фармацевтическую субстанцию и лекарственный препарат ТАМЕРОН.

4 декабря Институт 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.

Институт инженерной физики продолжает расширять перечень услуг организациям и частным лицам в области телефонии, IP-телевидения, Интернета, систем теле-, видеонаблюдения, ограничения доступа, охранно-пожарных сигнализаций, электроизмерительных исследований. Расширяется и совершенствуется материально-техническая база. На завершающей стадии находится строительство и оборудование производственно-технологического комплекса на улице Сиреневая.

Считаю плодотворной социальную деятельность Института в интересах организаций и жителей Серпухова. Впервые за последние годы спортсмены Института приняли участие в Спартакиаде трудящихся предприятий и организаций городского округа Серпухов и заняли призовые места во многих видах состязаний.

Мы благодарны партнерам, заказчикам, коллегам за плодотворное сотрудничество в уходящем году. Желаем всем оптимизма, процветания, стабильности и успехов.

Новогодние и рождественские дни – время поздравлений и улыбок, время подарков и чудес. Давайте будем внимательны и добры друг к другу, дарить тепло, ведь этого так не хватает всем нам в современной непростой ситуации и динамичной жизни. Пусть в наступающем году вас окружают и поддерживают единомышленники, верные друзья и близкие, любимые люди. Пусть исполняются самые заветные желания, реализуются планы и проекты. Счастья, здоровья и успехов в наступающем году!

УДК 53.091

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ РАКЕТНЫХ СИСТЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗАКОНАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ

# MODELING OF RELIABILITY INDICATORS OF INDIVIDUAL COMPONENTS OF ROCKET SYSTEMS UNDER DIFFERENT LAWS OF STRENGTH AND STRESS DISTRIBUTION

Алексей Игоревич Алаторцев
*доктор технических наук*
начальник отдела
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: alexalat@yandex.ru

Дмитрий Юрьевич Голов
*кандидат технических наук*
начальник кафедры
ВА РВСН имени Петра Великого
(филиал в г. Серпухове)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (966) 032-14-91
E-mail: golov@yandex.ru

**Аннотация**
В статье представлены подходы к расчету надежности отдельных узлов ракетных систем при нормальном распределении как прочности, так и напряжения, а также нормальном распределении прочности и экспоненциальном напряжении.
**Ключевые слова:** надежность, ракетная система, прочность, закон распределения, математическое моделирование, напряжение.

**Summary**
The article presents approaches to calculating the reliability of individual nodes missile systems with a normal distribution of both strength and stress, as well as normal distribution the exponential voltage.
**Keywords:** reliability, missile system, strength, distribution law, mathematical modeling, stress.

Отличительной особенностью математических моделей, касающихся функционирования ракетных систем, является их комплексность, связанная со сложностью моделирования процессов, например деформирования отдельных узлов под действием приложенной нагрузки. Для современных математических моделей характерно представление объекта моделирования в виде сложной системы взаимодействующих элементов, что обуславливает применение современных вычислительных методов и ЭВМ для получения и анализа результатов моделирования. Зачастую при моделировании функционирования ракетных систем приходится создавать целый спектр моделей одного и того же объекта, каждая из которых наиболее эффективно решает возможные на нем задачи. Модели, ориентированные на сложное исследование цели, касающиеся функционирования ракетных систем, представляются широким диапазоном исходных параметров с удовлетворительной точностью и способствуют получению как количественных, так и качественных результатов.

Таким образом, содержательная постановка задачи основывается на перечне сформулированных вопросов об объекте моделирования, что иногда является самостоятельной проблемой, требующей для своего решения компетентных специалистов в рассматриваемой области знаний, которые должны обладать способностью, выделить из большого объема слабо формализованной информации главное [2].

В виду этого, в содержательную часть формализации модельного представления о функционировании ракетных систем целесообразно включить:

- всестороннее изучение объекта моделирования с целью выяснения роли ключевых факторов и механизмов, влияющих на его функционирование, определения значимых параметров, описывающих объект моделирования;
- анализ имеющейся вербально-экспериментальной информации об аналогичных объектах;
- обзор публикаций и других информационных источников;

● план последовательности выполнения мероприятий по разработке математической модели.

Указанная содержательная часть постановки задачи моделирования должна варьироваться в процессе разработки модели, но, не допуская глобальных правок. В случае если сам процесс функционирования ракетных систем является объектом моделирования, то содержательную часть иногда называют технической постановкой задачи, что является предварительным этапом подготовки технического задания на разработку модели.

Традиционно отдельные элементы ракетных систем должны отвечать высоким требованиям по надежности в процессе эксплуатации. Поэтому, чтобы оценить надежность, целесообразно знать распределение случайных величин – прочности $T$ и нагрузки $t$ [1,3].

Обозначим через $f_t(t)$ плотность распределения напряжения $t$, а через $f_T(T)$ плотность распределения прочности $T$. Тогда надежность будет иметь вид:

$$R=P(T>t)=P(T-t>0). \quad (1)$$

Вполне очевидно, что те или иные распределения рассматриваемых величин описываются различными законами.

Рассмотрим вычисление надежности отдельного узла ракетной системы при нормальном распределении прочности и напряжения.

Плотность нормального распределения напряжения:

$$f_t(t)=\frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu_t}{\sigma_t}\right)^2\right],-\infty<t<\infty. \quad (2)$$

Плотность нормального распределения прочности:

$$f_T(T)=\frac{1}{\sigma_T\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-\mu_T}{\sigma_T}\right)^2\right],-\infty<T<\infty, \quad (3)$$

где $\mu_t$ – математическое ожидание напряжения;
$\sigma_t$ – среднее квадратическое отклонение нагрузки;
$\mu_T$ – математическое ожидание прочности;
$\sigma_T$ – среднее квадратическое отклонение прочности.

Если ввести случайную величину $y=T-t$, то она тоже будет иметь нормальное распределение с математическим ожиданием:

$$\mu_y=\mu_T-\mu_t, \quad (4)$$

и средним квадратическим отклонением:

$$\sigma_y=\sqrt{\sigma_T^2+\sigma_t^2}.$$

Тогда надежность можно выразить через $y$, как:

$$R=P(y>0)=\int_0^\infty\frac{1}{\sigma_y\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]dy.$$

Если $z=(y-\mu_y)/\sigma_y$, то $\sigma_y dz=dy$. При $y=0$ нижний предел случайной величины $z$ имеет вид:

$$z=\frac{0-\mu_y}{\sigma_y}=-\frac{\mu_T-\mu_t}{\sqrt{\sigma_T^2+\sigma_t^2}}, \quad (5)$$

а при $y\to+\infty$ верхний предел $z\to+\infty$. Следовательно,

$$R=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\frac{\mu_T-\mu_t}{\sqrt{\sigma_T^2+\sigma_s^2}}}^{\infty}e^{-z^2/2}\,dz. \quad (6)$$

Известно, что $z=(y-\mu_y)/\sigma_y$ является нормированной случайной величиной, распределенной по нормальному закону, тогда соотношение (5) обычно называется уравнением связи. Поэтому выражение (6) можно представить с помощью функции Лапласа:

$$R=1-\Phi\left(-\frac{\mu_T-\mu_t}{\sqrt{\sigma_T^2+\sigma_t^2}}\right). \quad (7)$$

Приведем пример определения надежности несущего агрегата при следующих исходных данных: $\mu_t$=300 кПа, $\sigma_t$=30 кПа, $\mu_T$=400 кПа, $\sigma_T$=50 кПа.

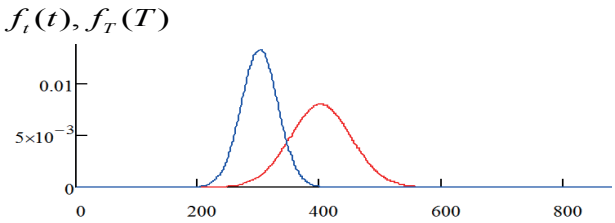



**Рис. 1.** Законы распределения нагружения (синий цвет) и прочности (красный цвет)

Из приведенных законов распределения видно, что площадь области пересечения графиков функций является вероятностной характеристикой надежности отдельного узла ракетной системы при указанных исходных данных.

Аналогичные исследования проводятся и для других законов распределения прочности и нагружения. Приведем математические выкладки для нормального распределения прочности и экспоненциального распределения напряжения.

Плотность нормального распределения прочности представлена выражением (3), а плотность экспоненциального распределения напряжения:

$$f_t(t)=\lambda e^{-\lambda t},t\ge0. \quad (8)$$

Известно, что $\mu_t=1/\lambda$ и $\sigma_t=1/\lambda$. Выражение для определения надежности ракетных систем будет выглядеть следующим образом:

$$R=\int_0^\infty f_t(T)\left[\int_0^T f_t(t)dt\right]dT. \quad (9)$$

При

$$\int_0^T f_t(t)dt=\int_0^T\lambda e^{-\lambda t}dt=1-e^{-\lambda T}$$

получаем:

$$R=\int_0^\infty \frac{1}{\sigma_T\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-\mu_T}{\sigma_T}\right)^2\right](1-e^{-\lambda T})dT=\frac{1}{\sigma_T\sqrt{2\pi}}\int_0^\infty \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-\mu_T}{\sigma_T}\right)^2\right]dT-$$
$$-\frac{1}{\sigma_T\sqrt{2\pi}}\int_0^\infty \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-\mu_T}{\sigma_T}\right)^2\right]\hat{\Phi}^{\lambda T}dT=1-\left(-\frac{\mu_T}{\sigma_T}\right)-\frac{1}{\sigma_T\sqrt{2\pi}}\times \quad (10)$$
$$\times\int_0^\infty \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_T^2}\left[\left(T-\mu_T+\lambda\sigma_T^2\right)^2+2\mu_T\sigma_T^2-\lambda^2\sigma_T^4\right]\right\}dT.$$

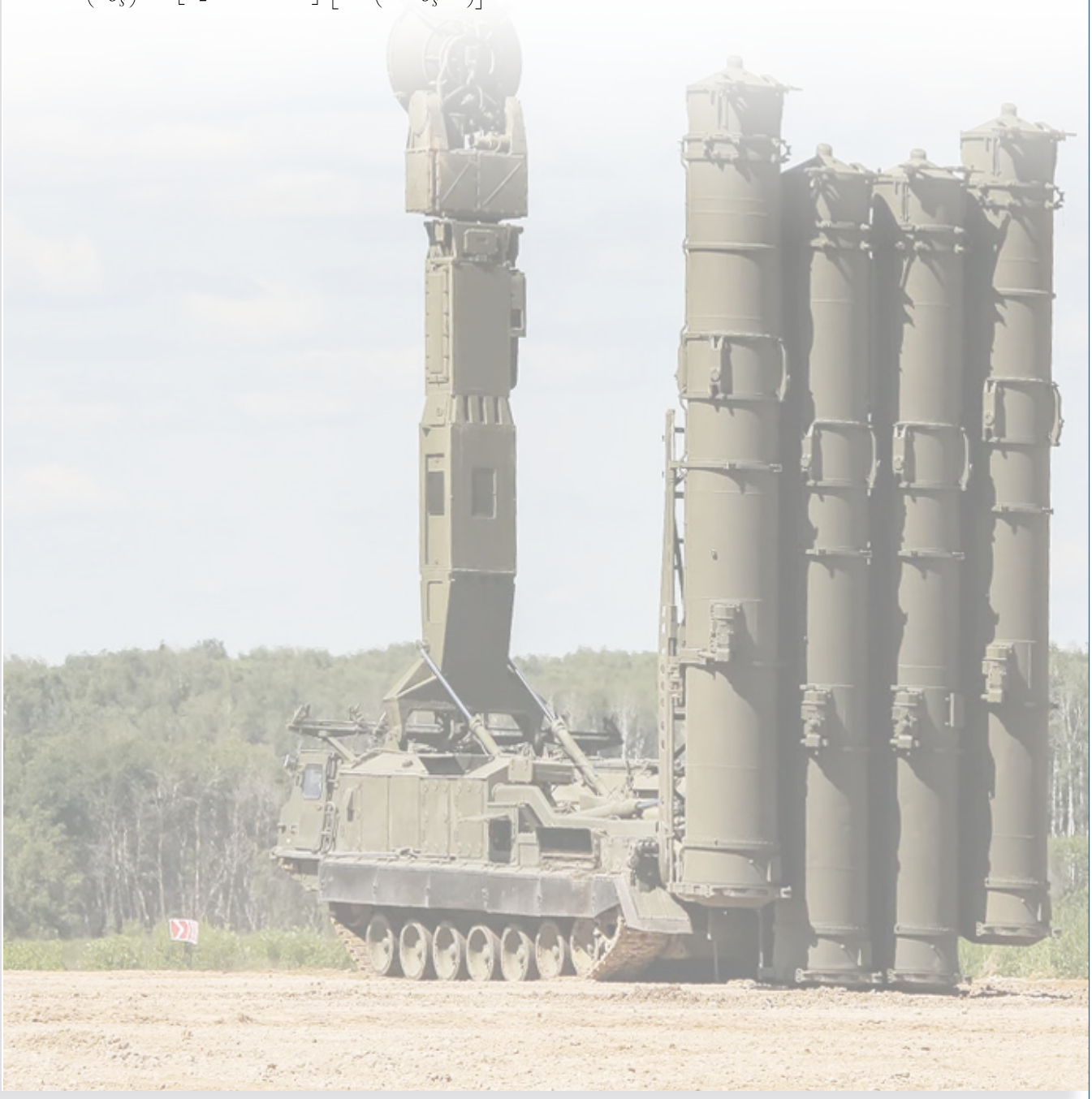
Если положить $\tau=\left(T-\mu_T+\lambda\sigma_T^2\right)^2/\sigma_T$, то $\sigma_t d\tau=dT$. Теперь выражение для $R$ принимает вид:

$$R=1-\Phi\left(-\frac{\mu_S}{\sigma_S}\right)-\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{\frac{-\mu_S-\lambda\sigma_S^2}{\sigma_S}}^{\infty}\exp\left[-\frac{t^2}{2}\right]\times\exp\left[-\frac{1}{2}\left(2\mu_S\lambda-\lambda^2\sigma_S^2\right)\right]dt= \quad (11)$$
$$=1-\Phi\left(-\frac{\mu_S}{\sigma_S}\right)-\exp\left[-\frac{1}{2}\left(2\mu_S\lambda-\lambda^2\sigma_S^2\right)\right]\times\left[1-\Phi\left(-\frac{\mu_S-\lambda\,\sigma_S^2}{\sigma_S}\right)\right].$$

Таким образом, с помощью выражения (11) также можно определять вероятностные характеристики надежности отдельных узлов ракетных систем.

**Литература**

1. Надежность электронных элементов и систем. Под ред. Х.Шнайдера. Пер. с нем. М.: Мир, 1977. 258 с.
2. Введение в математическое моделирование: учеб. пособие / Под ред. П.В. Трусова. М.: Логос, 2017. 440 с.
3. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980. 607 с.



УДК 519.21; 519.713; 524.852; 53.02; 575.224

# ТРИПЛИКАТОР КАК МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УТРАИВАЮЩИХСЯ ПЕРИОДОВ

# TRIPLICATOR AS A FORMATION MECHANISM FOR THE UNIVERSAL PERIOD–TRIPLING SYSTEM

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)73-94-64
E-mail: kolombet@iteb.ru

Вадим Николаевич Лесных
младший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: 1253vadim@mail.ru

Александр Владимирович Елистратов
ведущий инженер
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: unenlagia@yandex.ru

**Аннотация**

В этой статье дается краткий обзор исследований по теме трипликатора – грандиозной природной структуры, главным, наиболее ярко бросающемся в глаза проявлением которой оказалось утроение периодов. В принципе, это утроение крайне напоминает удвоение, характерное для биологических явлений и объектов, например, для биологической клетки и для полимеразной цепной реакции (ПЦР), применяемой сейчас уже повсеместно, в том числе, для актуальных сейчас экспресс-анализов на КОВИД-19. Размножение вирусов характеризуется, скорее, не целочисленным, даже множественным коэффициентом: по сути, это работа мультипликатора, хотя в процессе производства каждого экземпляра вируса используется обычное для биологического процесса удвоение, матричное копирование генетического материала. Для цепных ядерных и химических реакций/взрывов коэффициент умножения часто бывает в среднем тоже не целочисленным. В технических системах нами обнаружено именно утроение, что обещает перспективу многообразных конкретных технических внедрений.

**Ключевые слова:** утроение периода, удвоение периода, универсальная система утраивающихся периодов, зрение человека, зрение животных, планковское время, треугольник Серпинского, мутации, дубликатор, трипликатор.

**Summary**

This article provides a brief overview of research on the triplicator, a grandiose natural structure, the main, most striking manifestation of which is the tripling of periods. In principle, this tripling is extremely reminiscent of the doubling which is characteristic for biological phenomena and objects, for example, for a biological cell and for the polymerase chain reaction (PCR), which is now used everywhere, including for the now urgent express analyzes on COVID-19. The multiplication of viruses is characterized, rather, by a non-integer, even multiple, coefficient: in fact, this is the work of a multiplicator, although in the process of producing each copy of a virus, matrix duplication of genetic material is used, which is usual for it as for a biological process. For chain nuclear and chemical reactions/explosions, the multiplication factor is often also not integer. In technical systems, we have discovered precisely the tripling, which promises the prospect of a variety of specific technical implementations.

**Keywords:** period tripling, period doubling, universal period-tripling system, human vision, animal vision, Planck time, Sierpinski triangle, mutations, duplicator, triplicator.

Насколько известно, исследование идеи трипликатора начал в 1970-х годах Хартмут Мюллер, тогда еще студент Ленинградского университета из ГДР. Потом он продолжил эти исследования уже как преподаватель одного из волгоградских вузов и после этого, как основатель и директор небольшого научного института в Германии. Этот институт был основан на спон-

сорские деньги, поскольку идеи Х.Мюллера об утраивающихся периодах дали ему возможность выполнить для спонсора конкретное широкомасштабно внедренное усовершенствование в технике производства актуальных товаров пищевой промышленности; [1], см. также [2-9]. По-видимому, в то же время или несколько позже к идее трипликатора независимо пришел и стал ее развивать и проповедовать Стефен Петц в США [10].

В ИТЭБ РАН начальный интерес к теме УСУП (универсальной системы утраивающихся периодов) был простимулирован докладами Х.Мюллера на серии семинаров в этом институте. Спустя приблизительно десять лет, в 2014 году, вышла статья С.Петца [11], и именно она с 2015 года запустила уже исследования в ИТЭБ РАН, успешно продолжающиеся до сих пор [12-29].

В своем более простом подходе С.Петц описал, что периоды $T_{k;n}$, обнаруживаемые в самых разных природных процессах в широком спектре временных масштабов, отчетливо тяготеют к

$$T_{k;n} = T_0\, 3^k/n,$$

где $T_0$=114.5722… лет при $n$=1 или 2, $k$=0÷15.

Яркой иллюстрацией универсальной системы утраивающихся периодов может быть, например, экспериментально обнаруженная [12, 30, 31] зависимость вероятности изменения качества памяти (т.н. памятного следа) с течением времени. Оказалось, что можно наблюдать осцилляции величины вероятности вспомнить о прошедшем событии почти в десятке последующих утроений времени: событие вспоминается, потом быстро почти забывается, потом через утроенный промежуток времени снова вспоминается, снова забывается и т.д. На *рисунке 1* это

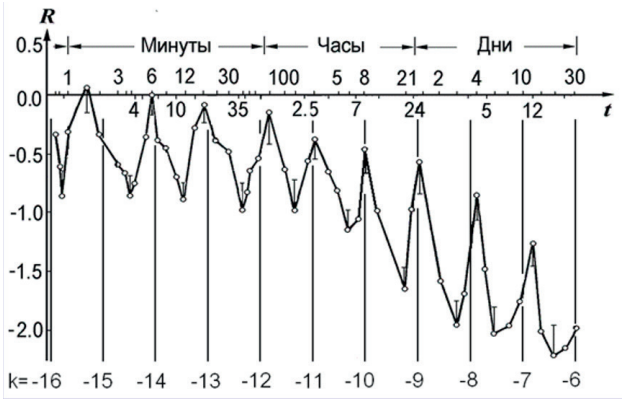



**Рис. 1.** След универсальной системы утраивающихся периодов (УСУП), проявившейся в данном примере в работе памяти человека при запоминании серии из пяти случайных двузначных чисел. Это экспериментальный результат выполненного А.Т. Бондарем скрупулезного масштабного исследования особенностей памяти у более чем 500 11-12-летних школьников г. Пущино

утраивающиеся интервалы времени ~7 мин, ~21 мин, ~1 час, ~3 часа, ~9 часов, ~1 сутки, ~3 суток, … Эти характерные времена отвечают периодам $T_{k;n}$ при $n$=2. Случаю $n$=1 отвечает серия провалов между пиками, т.е. серия моментов ухудшения памяти. По-видимому, в эти важные моменты происходит перезапись содержимого памяти к последующему этапу ее хранения.

Совмещение результатов исследований УСУП С. Петцем и А.Т. Бондарем представлены на *рисунке 2*.

После обнаружения частот УСУП звукового диапазона в слуховом аппарате человека ($k$=-29÷-22), частот, на которых в физиотерапевтических отделениях работают в мегагерцовой области приборы для УВЧ-терапии и диатермии ($k$=-36÷-35), а в гигагерцовой – процессоры современных компьютеров ($k$=-40÷-39), естественно было обратиться к поиску УСУП в механиз-

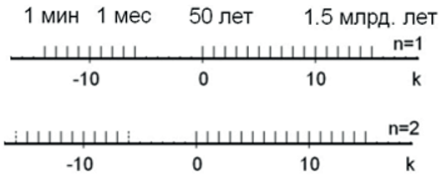



**Рис. 2.** В правой части этого схематического рисунка изображены периоды $T_{k;n}$ при $n$=1 и 2 при $k$=0÷15, в левой – результаты, полученные в А.Т. Бондарем при $k$=-16÷-6

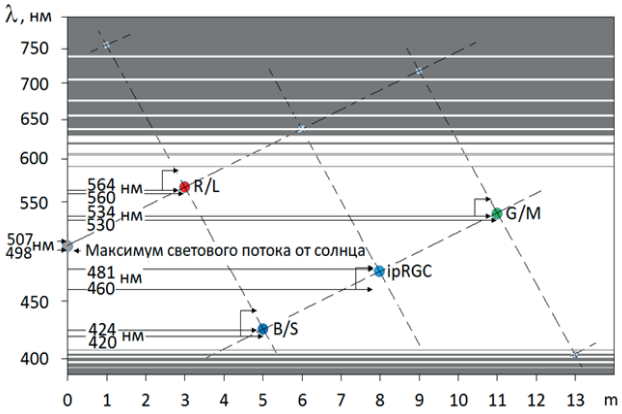



**Рис. 3.** Сеть узлов, определяемая модифицированной формулой для $T_{k;n}$. В области периодов световых волн, различимых глазом человека, (см. светлую горизонтальную зону на рисунке) располагается ограниченное количество узлов. Оказывается, что именно на эти узлы (серый, красный, синий и зеленый) настроены максимумы светочувствительности пигментов глаза человека – родопсина и трех йодопсинов. Пятая точка, помеченная как ipRGC, отвечает меланопсину – пигменту, ответственному за отличие света от темноты (т.н. «третий глаз», настраивающий режим сна/бодрствования); в аналогии с прогрессивной эволюцией компьютерных мониторов это самый простой, еще черно-белый монитор. Стрелки показывают диапазон разнообразия имеющихся в литературе данных о положениях максимумов чувствительности пигментов глаза человека [17, 19]

ме зрения человека, т.е. в оптической области частот. К этому моменту и С.Петцем, и группой исследователей в ИТЭБ РАН исходная формула для $T_{k;n}$ была под давлением накопившихся фактов существенно трансформирована к виду

$$T_{k;n} = T_0\, 3^k/2^m,$$

оказалось, что $n=2^m$, где $m$ – небольшое целое число. По физическому смыслу, параметр $m$ – это количество мутаций одного из двух возможных видов, происходящих в процессе процедуры утроения периода предполагаемым дискретным автоматом – трипликатором [22]. Новая формула стала по-настоящему двухпараметрической, т.е. стала определять решетку узлов на плоскости (*рисунок 3*).

Та же УСУП была выявлена в механизме зрения животных (птиц по [32] и, по-видимому, насекомых [33]). Расположение узлов у животных то же самое, но видят они в несколько различающихся оптических диапазонах, поэтому активны несколько отличающиеся наборы узлов.

Продлив в результате своих исследований нижнюю границу диапазона УСУП до $k$=-51, нам удалось вдруг осознать, что феномен УСУП простирается уже на 30 десятичных порядков. Безо всякого сомнения это означает крайнюю общность физической природы УСУП: при смене характерного времени в десятки, сотни, а, тем более, в миллионы, миллиарды и т.д. раз физические условия меняются настолько радикально, что от явлений прежнего масштаба ничего не остается. Феномен УСУП переходит таким образом в разряд фундаментальных физических феноменов.

Обратив также внимание, что при смещении на десятки десятичных порядков, расчетные значения периодов нисколько не сместились относительно экспериментальных, легко получить уверенность в существовании продолжения УСУП в область периодов все более микроскопических процессов. Хотя неясно, насколько долго этот прогноз будет успешен, важно было осознать, что очевидный предел этой экспансии УСУП задает уже само устройство мироздания. Принципиальный предел – планковский масштаб – достигается уже при удвоении логарифмического масштаба (*рисунок 4*).

Таким образом, естественно предположить, что фундаментальная природа УСУП обусловлена тем, что процедура утроений периодов зарождается где-то в окрестности планковского времени.

Возможную процедуру, близкую к образованию структуры, близкой к УСУП описывает процесс образования равностороннего треугольника Серпинского (ТС). На *рисунке 5* слева в рамочке показана итерационная процедура, повторения которой приводят к ТС. Количество прямолинейных отрезков (графического представления периодов) растет как $3^k$, а размер каждого такого отрезка уменьшается в $2^k$ раз.

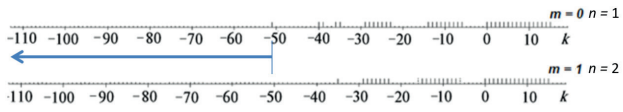



**Рис. 4.** УСУП уже подтверждена и исследована в более чем в половине масштабов вселенной. Принципиальным становится вопрос об УСУП в планковском масштабе (см. самый левый край на рисунке, куда показывает стрелка из окрестности последнего изученного масштаба $k$=-51, где (см. *рисунок 3*) функционирует зрение человека и животных)

**Рис. 5.** Образование треугольника Серпинского. Итерационная процедура выделена в рамочке

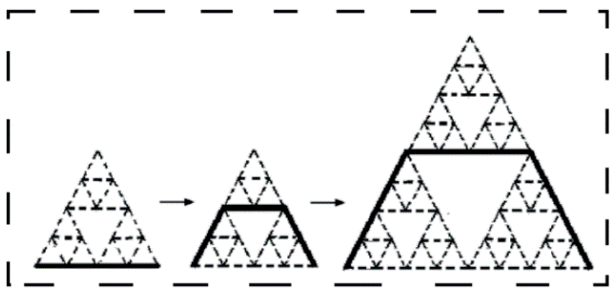


**Рис. 6.** Итерационная процедура утроения: из одного отрезка (периода планковского масштаба) появляется три таких же отрезка, и эта процедура может точно так же повториться уже для каждого из этих трех отрезков. И т.д. Это трипликатор – механизм, дающий множественные ($3^k$) утроения

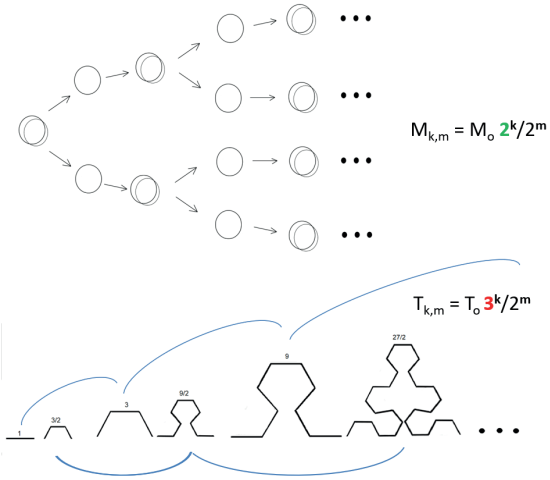



**Рис. 7.** Схематические изображения дубликатора (вверху) и трипликатора (внизу). Их отличие в основании степени мультипликатора: двойка это или тройка?

Чтобы приблизиться к имитации реальной УСУП нужно в процедуру итерации включить на каждом этапе удвоение (*рисунок 6*). В результате всего около 130 итераций утроения линейный планковский период скомкается до треугольника Серпинского, а общая длина его ломаной линии достигнет эквивалента космологического времени.

Этот процесс гомологичен процедуре деления биологической клетки: сначала образуется пара дочерних клеток с обедненным вдвое количеством генетического материала, затем генетический материал в каждой клетке удваивается.

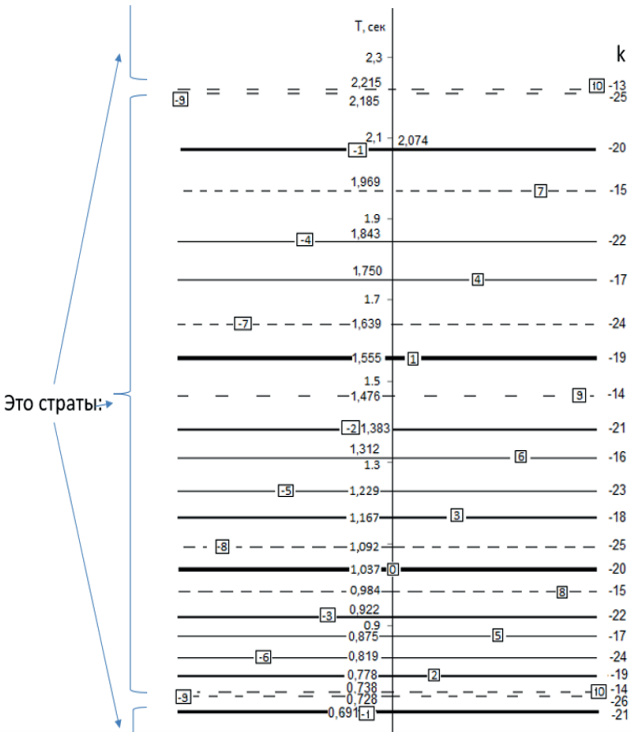



**Рис. 8.** Страта – повторяющийся характерный паттерн периодов УСУП. Численные значения периодов отличаются от страты к страте втрое. Более вероятные периоды выделены более широкими линиями. Параметр *m* периода $T_{k;m}$ представлен в рамочке, параметр *k* – в колонке справа

И далее процесс удвоения числа полноценных клеток повторяется. Это дубликатор, он лежит в основе биосферы. Биосфера возникла тогда, когда в хаосе явлений, описываемых молекулярно-кинетической теорией, возник дубликатор. Работа дубликатора привела к возникновению биосферы. Можно предположить, что точно таким же образом сосуществуют утроения в планковском масштабе и, как следствие, сама вселенная во всех ее промежуточных масштабах (*рисунки 4, 7*).

Такова модельная теория явления УСУП, сложившаяся к настоящему моменту времени. Она имеет большую общность, и позволяет связывать события как разных масштабов, так и относящихся к традиционно не смешиваемым областям явлений. К тому же, эта теория ничему не противоречит. Наоборот, она подтверждается все новыми наблюдениями на различных экспериментальных установках.

При экспериментах большое значение имеет спектр наиболее вероятных частот УСУП. Из всего спектра значений $T_{k;m}$ удобно выделить повторяющаяся с периодом 3 структуру, т.н. страту – картину характерно расположенных значений периодов различной интенсивности, т.е. различной вероятности проявления в природе и в эксперименте (*рисунок 8*).

На *рисунке 9* представлены итоги заданного последовательным изменением через АЦП управляющего напряжения, задающего медленное смещение средней частоты релаксационного генератора периодических колебаний, дополнительно качаемой суточным температурным дрейфом. Когда частота генератора находится в течение суток далеко от резонанса с частотами УСУП, виден характерный температурный около-периодичный 24-часовой дрейф. Во время же резонанса с фундаментально обусловленными периодами УСУП раз за разом наблюдаются соответствующие характерные искажения околосуточного дрейфа частоты – выбросы.

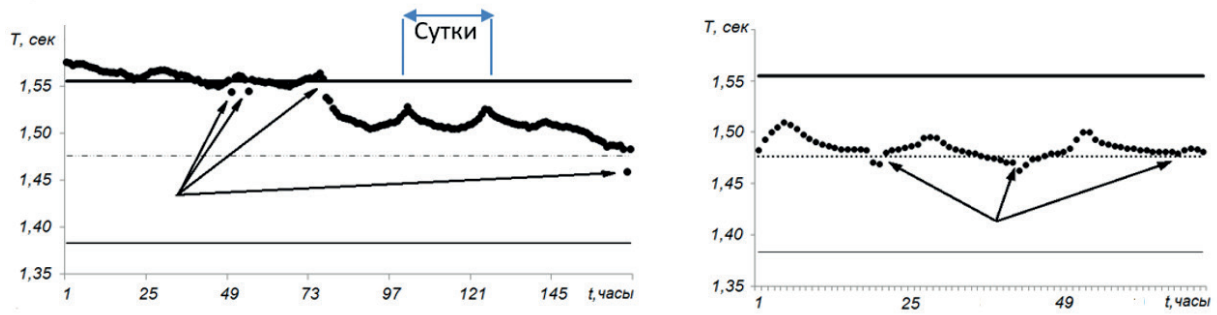



**Рис. 9.** Опыт в течение одной из декад сентября 2018 г. на установке «А». Волны – отражение суточного хода частоты генератора, не экранированного от внешних изменений температуры. Аномалии наблюдаются при резонансе частоты генератора с фундаментальными частотами УСУП

Медленно изменяя электрические параметры, определяющие частоту генератора, можно при достаточно хорошем термостатировании добиваться наблюдения дискретных переходов между соседними уровнями УСУП (*рисунки 10* и *11*).

Перспективным может оказаться опыт, нацеленный на провокацию коррелированного поведения двух надежно изолированных друг от друга одинаково настроенных генераторов. Это связано с фундаментальной физической природой самого феномена УСУП. В идеале, дискретные переходы, наблюдаемые на *рисунках 10* и *11*, не зависят ни от каких-либо тривиальных параметров: в формуле для $T_{k;m}$ есть только целые числа $k$ и $m$, а также неизменный эмпирически определенный период $T_0$. Сейчас кажется маловероятной какая-либо синхронизация дискретных переходов вида изображенных на *рисунке 10* или *рисунке 11*, но ввиду фундаментальной физической значимости феномена в этом направлении стоит работать, продолжая поиск и накопление феноменологического материала.

Таким образом, выполняя исследование универсальной системы утраивающихся периодов на нескольких установках, мы проиллюстрировали на различных временных интервалах наличие дискретных значений периода УСУП и дискретных переходов между ними. Согласно развиваемой модели, можно утверждать, что такие аномалии должны наблюдаться при резонансе с фундаментальными частотами УСУП. Этот феномен необходимо учитывать, и со временем научиться и привыкнуть использовать его разработчикам и эксплуатационникам технических систем, а также соответствующей аппаратуры.

**Литература**

1. Muller H. Fractal scaling models of resonant oscillations in chain systems of harmonic oscillators // Progress in physics 2009, iss. 2, Pp.72-76.
2. Müller H. Emergence of Particle Masses in Fractal Scaling Models of Matter // Progress in Physics, 2012. №8(4). Pp.44-47.
3. Müller H. Scaling of Body Masses and Orbital Periods in the Solar System // Progress in Physics, 2015. №11(2). Pp.133-135.
4. Müller H. Scale-Invariant Models of Natural Oscillations in Chain Systems and Their Cosmological Significance // Progress in Physics, 2017. №13(4). Pp.189-199.
5. Müller H. Global Scaling as Heuristic Model for Search of Additional Planets in the Solar System // Progress in Physics, 2017. №13(4). Pp.206-208.
6. Müller H. Chain Systems of Harmonic Quantum Oscillators as a Fractal Model of Matter and Global Scaling in Biophysics // Progress in Physics, 2017. №13(4). Pp.231-233.
7. Müller H. Astrobiological Aspects of Global Scaling // Progress in Physics, 2018. №14(1). Pp.3-6.
8. Müller H. Gravity as Attractor Effect of Stability Nodes in Chain Systems of Harmonic Quantum Oscillators // Progress in Physics. 2018. №14(1). Pp.19-23.
9. Müller H. Quantum Gravity Aspects of Global Scaling and the Seismic Profile of the Earth // Progress in Physics, 2018. №14(1). Pp.41-45.
10. Puetz, S.J., The Unified Cycle Theory: How Cycles Dominate the Structure of the Universe and Influence Life on Earth. (2009) Outskirts Press, Denver, Colorado; ISBN: 978-1-4327-1216-7.
11. Puetz Stephen J., Prokoph Andreas, Borchardt Glenn, Mason Edward W. Evidence of synchronous, decadal to billion- year cycles in geological,

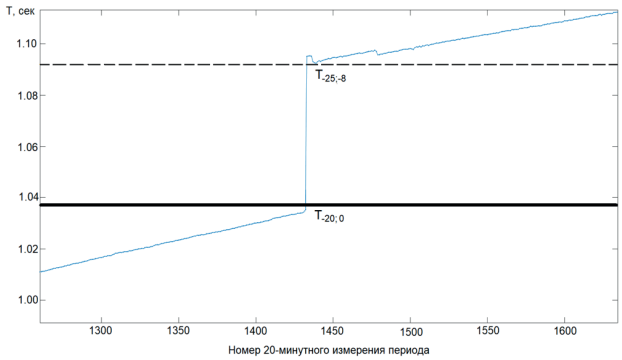



**Рис. 10.** Медленное сканирование частоты генератора в январе 2020 г. на установке «В» в двойном контуре термостабилизации привело к наблюдению дискретного перехода между соседними уровнями УСУП

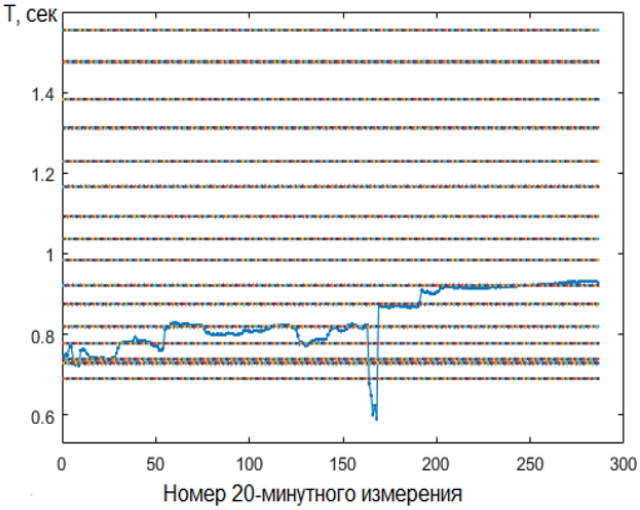
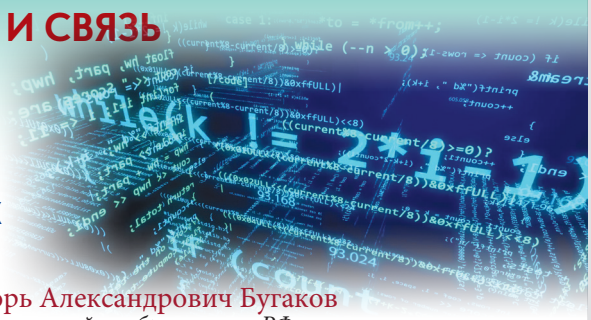



**Рис. 11.** Медленное сканирование частоты генератора в январе 2020 г. на установке «С» в двойном контуре термостабилизации показало тенденцию к проявлению серии дискретных переходов между последовательными соседними уровнями УСУП. Горизонтальные линии означают периоды УСУП

genetic, and astronomical events // Chaos, Solitons & Fractals. 2014, 62-63, Pp.55-75.
12. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // Биофизика, 2015. №60(6). С.1208-1215.
13. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Федоров М.В. Обнаружение в технических устройствах фрактальной системы утраивающихся периодов, известной по своим физическим геофизическим, биофизическим и биологическим манифестациям // Биофизика, 2016. №61(3). С.615-624.
14. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. О перспективе применения фундаментальной системы утраивающихся периодов в мультимасштабных технических устройствах // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С.8-11.
15. Коломбет В.А., Коломбет Е.В., Лесных В.Н. Предсказание тактовой частоты процессора будущего поколения компьютеров как пример эффективности использования в технике свойств фрактальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2016. №2(40). С.55-58.
16. Коломбет В.А. Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Особенность проявления фрактальной системы утраивающихся периодов в телевещании и мобильной телефонии // Известия Института инженерной физики, 2016. №4(42). С.20-24.
17. Коломбет В.А. Обнаружение частот Петца в когнитивных процессах // Материалы всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». 25-29 сентября 2017 г., Нижний Новгород, ИПФ. С.126-128.
18. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Скавуляк А.Н., Коломбет Е.В., А.Т. Бондарь. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в УВЧ-терапии // Известия Института инженерной физики, 2017. №2(44). С.70-73.
19. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Учет существования сети Петца как новый путь к повышению эффективности распознавания целей // Известия Института инженерной физики, 2017. №3(45). С.37-39.
20. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Определение перспективных частот РЛС // Известия Института инженерной физики, 2017. №4(46). С.18-21.
21. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Бондарь А.Т. Треугольник Серпинского как удобная математическая модель для описания универсальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2018. №4(47). С.63-68.
22. Коломбет В.А., Архипов В.Ю., Елистратов А.В., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Серая О.Ю. Стохастика и мутации в универсальной системе утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2018. №2(48). С.56-62.
23. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Универсальная система утраивающихся периодов и музыкальный строй // Известия Института инженерной физики, 2018. №3(49). С.88-90.
24. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Новые перспективы приложений универсальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2018. №4(50). С.62-66.
25. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Елистратов А.В. О возможной природе осцилляций, приводящих к универсальной системе утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2019. №1(51). С.55-57.
26. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. О возникающей перспективе переопределения длительности секунды и длины метра // Известия Института инженерной физики, 2019. №2(52). С.77-83.
27. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Наблюдение универсальной системы утраивающихся периодов в экспериментах с генераторами периодических колебаний // Известия Института инженерной физики, 2019. №3(53). С.66-72.
28. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Соответствие сумеречного зрения человека универсальной системе утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2020. №1 (55). С.11-15.
29. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Бондарь А.Т. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в многосуточных биоритмах // Известия Института инженерной физики, 2020. №2 (56). С.33-38.
30. Бондарь А.Т. О закономерностях воспроизведения памятного следа во времени. ДАН СССР. 1977. 236. № 6. С. 1503.
31. Коломбет В.А. Введение в гипнографический психоанализ. М.: Изд. ООО МЭЙЛЕР, 2008. 224 с.
32. Goldsmith T. What birds see? Scientific American. 295, 68-75 (2006). doi: 10.1038/ scientificamerican0706-68
33. Pei-Ju Chen, Hiroko Awata, Atsuko Matsushita, En-Cheng Yang and Kentaro Arikawa. Extreme Spectral Richness in the Eye of the Common Bluebottle Butterfly *Graphium sarpedon* // Frontiers in Ecology and Evolution. March 2016. Volume 4. Article 18. www.frontiersin.org. doi: 10.3389/ fevo/2016/00018



УДК 621.394

# ОЦЕНИВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПРИЕМА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДА В КАНАЛАХ С НЕЗАВИСИМЫМИ И ГРУППИРУЮЩИМИСЯ ОШИБКАМИ

# ESTIMATION OF PROBABILITIES OF RECEPTION NOISEPROOF CODE IN CHANNELS WITH INDEPENDENT AND GROUPED ERRORS

Владислав Валентинович Квашенников
*доктор технических наук*
ведущий научный сотрудник
АО «Калужский научно-исследовательский институт телемеханических устройств»
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (910) 864-52-75
E-mail: kvashienvv@mail.ru

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

Александр Васильевич Кузин
начальник группы отдела стратегических вооружений, космических и специальных средств, элементной базы РЭА
Управление военных представительств МО РФ
Адрес. 119160, Москва, Комсомольский пр-т, д. 18, стр. 3

**Аннотация**

В статье приведены формулы для расчета вероятностей приема помехоустойчивого кода для биномиального канала и канала с группирующимися ошибками. Описано оценивание вероятностей правильного приема, необнаруженной ошибки и стирания кода. Вероятность необнаруженной ошибки для канала с независимыми ошибками рассчитывается по точной формуле с учетом спектра кода. Для канала с группирующимися ошибками используется упрощенная формула по объему сфер, с учетом коэффициента трансформации. В качестве моделей каналов с группирующимися ошибками используются модифицированная модель канала по Пуртову и марковская модель канала. Приведены результаты расчетов вероятностей приема для кода БЧХ (31,16,7) и кода Голея (23,12,7) с коррекцией 3-х ошибок в каналах с независимыми и группирующимися ошибками.

**Ключевые слова:** модель канала связи с независимыми и группирующимися ошибками, модифицированная модель канала по Пуртову, марковская модель канала, вероятности правильного приема, необнаруженной ошибки и стирания помехоустойчивого кода.

**Summary**

In article formulas are resulted and calculation of probabilities of reception of a noiseproof code for the binomial channel and the channel with grouping of errors is described. Calculation of probabilities of the correct reception, not found out error and code deleting is described. The probability of not found out error for the channel with independent errors pays off under the exact formula taking into account a code spectrum. For the channel with grouping of errors more simple approached formula on volume of spheres, taking into account transformation factor is used. As the channel with grouping of errors are used the modified model of the channel on Purtov and markov channel model. Results of calculations of probabilities of reception for code BCH (31,16,7) and code Goley (23,12,7) with correction of 3 errors in channels with independent and grouped errors are resulted.

**Keywords:** Model of a communication channel with the independent and grouped errors, the modified model of the channel on Purtov, markov model of the channel, probability of the correct reception, not found out error and deleting of a noiseproof code.

## Введение

Для повышения вероятности доведения сообщения в каналах связи с ошибками применяют помехоустойчивое кодирование. Для выбора помехоустойчивого кода и его параметров на этапе проектирования системы связи выполняют расчеты вероятностей приема сообщения. В различных источниках [1,2] достаточно подробно описано оценивание вероятностей приема для канала с независимыми ошибками (биномиальный канал). Однако, реальные каналы связи более точно описывают моделями с группирующимися ошибками и оценивание вероятностей приема сообщений в каналах с группирующимися ошибками имеет важное теоретическое и практическое значение.

Для защиты относительно коротких команд телекодового управления обычно используют блоковые коды. В настоящей статье представлен расчет вероятностей приема блокового по-

мехоустойчивого кода для биномиального канала, включая вероятность правильного приема, необнаруженной ошибки и стирания кода. Вероятность необнаруженной ошибки рассчитывается по точной формуле с учетом спектра кода, а также по упрощенной приближенной формуле с учетом коэффициента трансформации. В качестве моделей каналов с группированием ошибок рассматриваются дискретные каналы по модифицированной модели Пуртова и каналы по марковской модели. Для модели канала с группирующимися ошибками сначала рассчитывают блоковую статистику ошибок, т.е. вероятности t ошибок в блоке длины n символов (t=0…n), а затем приближенно оценивают вероятности приема кода. Блоковая статистика ошибок для марковской модели рассчитывается по рекуррентным формулам на основе переходных вероятностей ошибки и правильного приема.

### 1. Каналы с независимыми ошибками

Простейшей моделью канала связи является двоичный симметричный канал с независимыми ошибками. Канал называют двоичным, если передаются только двоичные символы информации 0 либо 1. Канал симметричный, если вероятность ошибки не зависит от передаваемых символов:

$$P(e/b=0)=P(e/b=1),$$

где $e/b=0$ и $e/b=1$ означают соответственно события возникновения ошибки при условии, что в канале передавался символ $b=0$ или $b=1$.

В канале с независимыми ошибками вероятность возникновения ошибки не зависит от того, какие комбинации ошибок предшествовали данной ошибке

$$P(e_0/e_{-1},e_{-2},..)=const, \quad (1)$$

где $e_0/e_{-1,}e_{-2,...}$ – событие возникновения ошибки на текущей позиции $e_0$, при условии, что ей предшествовала комбинация ошибок $e_{-1,}e_{-2,...}$.

Модель канала с независимыми ошибками достаточно точно описывает некоторые известные каналы связи: спутниковые, УКВ каналы в пределах прямой видимости, кабельные и волоконно-оптические линии связи. При использовании в канале с группирующимися ошибками перемежения символов, согласованного с длиной пакетов ошибок, канал приближается к каналу с независимыми ошибками. Канал связи с независимыми ошибками описывается только одним параметром $p$ – средней вероятностью ошибки на бит.

На этапе проектирования системы связи выбирают помехоустойчивый код, обеспечивающий вероятность ошибки сообщения не более некоторой достаточно малой величины, например 0,01 или 0,001. Помехоустойчивый код чаще всего выбирают из числа кодов, которые близки по корректирующей способности к наилучшим известным кодам и имеют не слишком сложный алгоритм декодирования. Таблица наилучших известных двоичных кодов для небольших блоковых длин $n \le 512$ с минимальным кодовым расстоянием вплоть до $d=29$ приведена в [3]. В этой таблице для различных блоковых длин $n$ и минимальных кодовых расстояний $d$ приведена избыточность $r=n-k$ наилучших кодов. Постоянно обновляемые таблицы таких кодов доступны на сайте [4].

На практике часто выбирают алгебраические коды, такие как коды Рида-Маллера, коды БЧХ, коды Рида-Соломона, которые для небольших длин немного проигрывают по вероятности ошибок наилучшим известным кодам, однако имеют более простые алгоритмы кодирования и декодирования. Разумный компромисс по критериям помехоустойчивости и сложности обеспечивают каскадные помехоустойчивые коды на основе кодов БЧХ и Рида-Соломона (БЧХ-РС) [5]. Каскадные коды являются асимптотически хорошими кодами, у которых отношение числа корректируемых ошибок к блоковой длине кода остается больше нуля при стремлении блоковой длины кода к бесконечности.

Обычно помехоустойчивый код задается тремя параметрами: блоковой длиной $n$, информационной длиной $k$ и минимальным кодовым расстоянием $d$. Код БЧХ с $n=31$, $k=16$ и $d=7$ записывается в виде БЧХ(31,16,7), а совершенные коды Хемминга с $n=15$ и Голея – соответственно запишутся Х(15,11,3) и Г(23,12,7). Более подробное описание кода включает задание спектра весов, который используют для точного расчета необнаруженной ошибки приема кода.

Сначала рассчитывают вероятность правильного приема. Для канала с независимыми ошибками вероятность правильного приема $P_1$ кода при исправлении $t$ ошибок распределена по биномиальному закону

$$P_1=\sum_{i=0}^{t} C_n^i p^i (1-p)^{n-i}, \quad (2)$$

где $t=\left\lceil \frac{d-1}{2} \right\rceil$ – число ошибок, корректируемых кодом.

Вероятность ошибочного декодирования или необнаруженной ошибки вычисляют с учетом спектра кода [6]

$$P_2=\sum_{i=0}^{t}(1-p)^n \sum_{w=d}^{n} A(w) \sum_{v=0}^{i} C_w^{i-v} C_{n-w}^{v} \left(\frac{p}{1-p}\right)^{w-i+2v}, \quad (3)$$

где $A(w)$ – спектр кода, т.е. количество слов в коде веса $w$ $(w=d…n)$.

Формулу (3) можно также найти в [7, 8]. Спектры некоторых не слишком длинных ко-

дов приведены в [9]. Существуют программы для расчета спектра линейного двоичного кода, заданного либо порождающей матрицей, либо порождающим многочленом кода. Для расчета спектра дуального кода используют формулу Мак-Вильямс [3].

Поскольку события правильного приема, необнаруженной ошибки и стирания кода образуют полную группу событий, то вероятность стирания кода теперь может быть вычислена

$$P_3 = 1 - P_1 - P_2 \qquad (4)$$

Для упрощения расчетов, а также, если определение спектра кода вызывает затруднения, вероятность необнаруженной ошибки приближенно оценивают по объему сфер с учетом коэффициента трансформации [10]. Введем $b$ – коэффициент трансформаций, равный отношению числа трансформированных кодов к числу стертых кодов, приближенно выражается

$$\beta = \frac{(2^k - 1) \times \sum_{i=0}^{t} C_n^i}{2^n - 2^k \times \sum_{i=0}^{t} C_n^i}. \qquad (5)$$

В числителе (5) записана оценка числа трансформированных кодов при коррекции $t$ ошибок, а в знаменателе – оценка числа стертых кодов. Тогда для вероятностей приема можно записать систему линейных уравнений

$$\begin{cases} P_2 + P_3 = 1 - P_1 \\ P_2 = \beta \cdot P_3 \end{cases}.$$

Отсюда вероятность ошибочного декодирования кода $P_2$ будет оцениваться через вероятность правильного приема

$$P_2 = \frac{\beta}{\beta + 1}(1 - P_1), \qquad (6)$$

а вероятности правильного приема $P_1$ и стирания $P_3$ вычисляют согласно (2) и (4).

### 2. Каналы с группированием ошибок по модифицированной модели Пуртова

Каналы связи, для которых не выполняется условие (1) и которые, следовательно, не являются каналами с независимыми ошибками, называют каналами с группированием ошибок. Одной из моделей каналов с группированием является модель Пуртова-Замрия-Захарова [10]. Эта модель задает блоковую статистику ошибок в канале

$$P(\geq t, n) = (n / t)^{1-a} p, \qquad (7)$$

где $P(\geq t,n)$ – вероятность $t$ и более ошибок в блоке длины $n$ бит;

$a$ – коэффициент группирования ошибок в канале ($0 \leq a \leq 1$);

$p$ – средняя вероятность ошибок на бит в канале.

В модели вводится новая универсальная характеристика канала – коэффициент группирования ошибок в канале $a$ ($0 \leq a \leq 1$), которая может задаваться для любого канала. При увеличении $a$ от 0 до 1 группирование ошибок в канале возрастает. При $a=0$ модель становится приближением к каналу с независимыми ошибками, а при $a=1$ ошибки группируются в одном пакете. Коэффициент группирования показывает, насколько канал с группированием ошибок отличается от канала с независимыми ошибками. Модель Пуртова описывается всего двумя параметрами: средней вероятностью ошибки на бит $p$ и коэффициентом группирования $a$. Рассматриваемая модель канала удобна для расчета вероятностей приема помехоустойчивых кодов, однако, модель становится математически некорректной при больших величинах $n$ и $t$.

Известна модификация этой модели, свободная от последнего недостатка [11]. Для канала с группированием ошибок согласно модифицированной модели канала Пуртова вероятность $t$ и более ошибок ($t \geq 2$) в блоке длины $n$ бит выражается формулой

$$P(\geq t, n) = (1 - (1 - p)^{n^{1-a}}) \times \prod_{j=2}^{t} \frac{\nu(j-1, n) - \frac{j-1}{n}}{\nu(j, n) - \frac{j-1}{n}}, \qquad (8)$$

где $$\nu(t, n) = \frac{p}{1 - (1 - p)^{\binom{n}{t}^{(1-a+a \times t/n)}}}.$$

Вероятность искажения слова помехоустойчивого кода длины $n$ бит

$$P(\geq 1, n) = 1 - (1 - p)^{n^{1-a}}. \qquad (9)$$

Вероятность безошибочного приема слов помехоустойчивого кода

$$P_1(0) = (1 - p)^{n^{1-a}}. \qquad (10)$$

Модифицированная модель канала Пуртова является достаточно общей и универсальной моделью. При соответствующем выборе своих параметров она с хорошей степенью приближения описывает многие каналы связи [12]:

- КВ канал –
  $p = 2.2 \cdot 10^{-3} – 5.7 \cdot 10^{-2}$;
  $a = 0.24 – 0.57$;
- радиорелейные –
  $p = 2.2 \cdot 10^{-6} – 9.1 \cdot 10^{-3}$;
  $a = 0.27 – 0.68$;
- тропосферные –
  $p = 1.2 \cdot 10^{-4} – 4.2 \cdot 10^{-2}$;
  $a = 0.44 – 0.56$;
- спутниковые –
  $p = 2 \cdot 10^{-6} – 5 \cdot 10^{-4}$;
  $a = 0.41 – 0.5$;
- коммутируемые ТЧ каналы городской телефонной сети –
  $p = 8.2 \cdot 10^{-6} – 1.5 \cdot 10^{-2}$;
  $a = 0.1 – 0.49$.

При декодировании кода с коррекцией $t$ ошибок вероятность правильного приема в канале с группированием ошибок

$$P_1 = 1 - P(\geq t+1, n), \qquad (11)$$

где $P(\geq t+1, n)$ рассчитывают по формуле (8).

Вероятность необнаруженной ошибки $P_2$ рассчитывают по объему сфер по формуле (5), а вероятность стирания $P_3$ вычисляют согласно (4).

### 3. Каналы с группированием ошибок по марковской модели ошибок

Одной из наиболее известных моделей дискретного канала с группированием ошибок является марковская модель [13]. В этой модели рассматривается последовательность $m$ состояний канала $S_0, S_1, \ldots, S_{m-1}$. В каждом из состояний ошибки возникают с вероятностью на бит соответственно $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_{m-1}$. Последовательность состояний канала $S_0, S_1, \ldots, S_{m-1}$ образует простую однородную цепь Маркова с конечным числом состояний. Цепь Маркова определяется матрицей переходных вероятностей

$$P = \left\| p_{ij} \right\| \quad i, j = 0..m-1, \qquad (12)$$

где $p_{ij}$ – вероятность перехода канала в состояние $S_j$, если известно, что в предыдущий момент времени канал находился в состоянии $S_i$.

Матрица переходных вероятностей является стохастической

$$p_{ij} \in [0,1], \quad \sum_{j=0}^{m-1} p_{ij} = 1 \quad i, j = 0..m-1.$$

Для марковской модели определяется вектор-строка

$$P_f = \left| p_{f_0}, p_{f_1}, \ldots, p_{f_{m-1}} \right|$$

финальных вероятностей, вычисляемых из системы линейных уравнений

$$P_f \times I = 1, \quad P_f \times P = P_f, \qquad (13)$$

где $I$ – единичный вектор-столбец размерности $m$.

Простейшей марковской моделью канала является модель с двумя состояниями или модель Гилберта-Эллиота. Эта модель описывается матрицей переходных вероятностей

$$P = \begin{Vmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{Vmatrix}$$

и вероятностью ошибок в каждом состоянии $\varepsilon_0$ и $\varepsilon_1$ $(i,j=0,1)$.

В [14] описано вычисление блоковой статистики канала через матричные вероятности, которое из-за сложности, может выполняться только для небольших величин $n$ и $t$. Ниже предложена формула для более простого расчета на основе рекуррентных соотношений.

Для двоичного канала с $m$ состояниями введем условные вероятности $p_{ij} \cdot \varepsilon_j$, $(i,j=0..m-1)$ – вероятность ошибки в состоянии $S_j$, при условии, что в предыдущий момент времени канал находился в состоянии $S_i$. Соответственно $p_{ij}(1-\varepsilon_j)$ является условной вероятностью правильного приема в состоянии $S_j$. Обозначим $P(j,i,n)$, $j=0..m-1$ – вероятности $i$ ошибок в блоке длины $n$ при условии, что канал на последнем символе блока находится в состоянии $S_j$. В каждом состоянии марковской модели канал ведет себя как биномиальный канал, поэтому, по формуле полной вероятности вероятность $P(j,i,n)$ можно записать в виде суммы вероятности $P(j,i,n-1)$, умноженной на вероятность безошибочного приема последнего бита блока, и вероятности $P(j,i-1,n-1)$, умноженной на вероятность ошибки последнего бита блока. Рекуррентное соотношение, определяющее вероятности $P(j,i,n)$ через вероятности $P(j,i,n-1)$ запишется [15]

$$P(j,i,n) = \sum_{k=0}^{m-1} \left( P(k,i,n-1) \cdot p_{ki} \cdot (1-\varepsilon_j) + P(k,i-1,n-1) \cdot p_{ki} \cdot \varepsilon_j \right)$$
$$j = 0..m-1, i = 0..n \qquad (14)$$

Начальные условия:

$P(j,0,1) = p_{f_j} \cdot (1-\varepsilon_j)$, $P(j,1,1) = p_{f_j} \cdot \varepsilon_j$, $P(j,i,n) = 0$ – если $i>n$ или $i<0$.

Вероятность $i$ ошибок в блоке длины $n$ будет

$$P(i,n) = \sum_{j=0}^{m-1} P(j,i,n),$$

а вероятность не более $t$ ошибок в блоке длины $n$

$$P(\leq t, n) = \sum_{i=0}^{t} P(i,n), \qquad (15)$$

которая и является вероятностью правильного приема $P_1$ кода. Затем, также, как и для модели канала Пуртова, вероятность необнаруженной ошибки $P_2$ рассчитывают в соответствии с (6), а вероятность стирания $P_3$ – согласно (4).

### 4. Примеры расчетов

В качестве примера оценим вероятности правильного приема $P_1$, необнаруженной ошибки $P_2$ и стирания $P_3$ для двоичных кодов БЧХ(31,16,7) и Голея(23,12,7). Оба кода корректируют 3 ошибки – $t=3$. Спектры кодов БЧХ и Голея соответственно запишутся [8]

$A_1(w)=(1,0,0,0,0,0,0,155,465,0,0,5208,8680,0,0,18259,$
$18259,0,0,8680,5208,0,0,465,155,0,0,0,0,0,0,1),$

$A_2(w)=(1,0,0,0,0,0,0,759,0,0,0,2576,0,0,0,759,0,0,0,$
$0,0,0,1).$

Вероятности $P_1$ и $P_2$ перечисленных кодов для канала с независимыми ошибками в зависимости от средней вероятности ошибки на бит $p$ представлены соответственно на *рисунках 1* и *2*. Аналогичные вероятности для канала по модифицированной модели Пуртова с коэффициентом группирования $a=0.3$ показаны на *рисунках 3* и *4*. Также, для сравнения были рассчитаны вероятности приема для марковской модели Гильберта-Элиота с матрицей переходных вероятностей

$$P = \begin{Vmatrix} 0,1 & 0,9 \\ 0,7 & 0,3 \end{Vmatrix}$$

и вероятностями ошибок в каждом состоянии $\varepsilon_0$=0,001 и $\varepsilon_1$=0,02. Соответственно вектор финальных вероятностей

$$P_f=(0{,}44,\ 0{,}56).$$

Средняя вероятность ошибки на бит в марковском канале связи примерно равна

$$p=\varepsilon_1 p_{f1}+\varepsilon_2 p_{f2}\approx 0{,}015.$$

Графики на *рисунках 1* и *2* для кода БЧХ изображены сплошными линиями, а для кода Голея – штриховыми линиями. Расчеты на марковской модели канала дают вероятность приема для кода БЧХ $P_1$=0,95 и $P_2$=0,009, а для кода Голея – $P_1$=0,97 и $P_2$=0,05.

Из рассмотрения графиков на *рисунках* 1 и 3 следует, что наилучшие результаты по вероятности правильного декодирования обеспечивает код Голея, а затем следует код БЧХ. Такие результаты можно объяснить тем, что код Голея является совершенным, плотно упакованным и стирания у него отсутствуют. У кода БЧХ довольно много стираний, которые уменьшают вероятность его правильного декодирования. Вероятность необнаруженной ошибки, наоборот, будет больше для кода Голея.

Сравнение вероятностей приема на канале с независимыми и группирующимися ошибками, показывает преимущество каналов с независимыми ошибками, по сравнению с каналами с группирующимися ошибками. Это можно объяснить тем, что выбранные коды эффективно исправляют только небольшое число независимых ошибок. Для повышения вероятности правильного приема в канале с группирующимися ошибками для данных кодов целесообразно использовать перемежение символов кода.

Результаты расчета вероятностей приема для модифицированной модели Пуртова остаточно близки к результатам расчета для модели Гильберта-Эллиота при равной средней вероятностью ошибки на бит в канале связи.

Приведенные расчеты относятся к жесткому декодированию кодов в пределах минимального кодового расстояния. При декодировании за пределами минимального кодового расстояния

***Зависимости вероятности правильного приема и необнаруженной ошибки от средней вероятности ошибки на бит в канале связи***

– код БЧХ (31,16,7), – код Голея (23,12,7)

Биномиальный канал

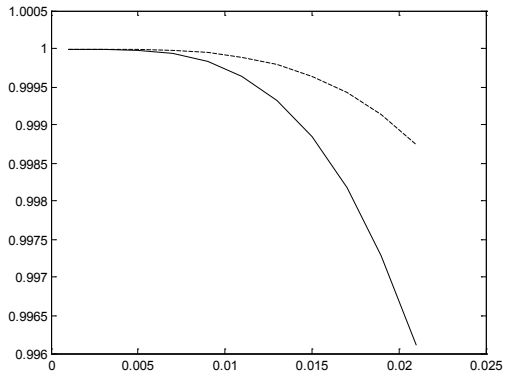



**Рис.1.** Вероятности правильного приема

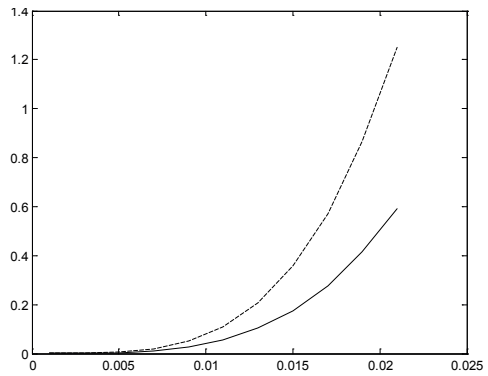



**Рис.2.** Вероятности необнаруженной ошибки

Модель канала Пуртова

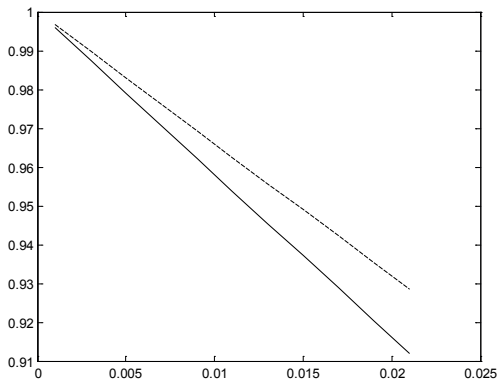



**Рис.3.** Вероятности правильного приема

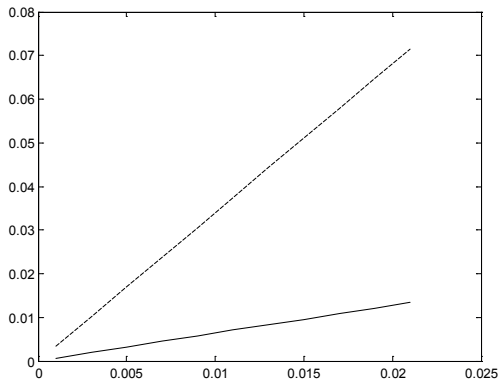



**Рис.4.** Вероятности необнаруженной ошибки

расчеты существенно усложняются. При мягком декодировании обычно выполняют расчеты только вероятности правильного приема кода, при этом считают, что в малошумящем канале число корректируемых ошибок примерно равно *d-1*.

**Заключение**

При проектировании системы связи выбирают помехоустойчивый код, вероятность ошибочного приема которого не более заданной величины. Для оценивания вероятностей приема на модели канала с независимыми ошибками используют формулы (2-6) для вероятности правильного приема, вероятностей необнаруженной ошибки и стирания. Реальные каналы существенно отличаются от канала с независимыми ошибками, поэтому для оценивания вероятностей приема используют модели с группирующимися ошибками. В качестве моделей каналов с группирующимися ошибками могут использоваться каналы по модифицированной модели Пуртова (формулы (7-11)) или по марковской модели (формулы (14-15)). Упрощение расчета вероятностей приема кода для марковской модели канала обеспечивается за счет вычислений по рекуррентным формулам.

**Литература**

1. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 594 с.
2. Морелос-Сарагоса М. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005. 320 с.
3. Мак-Вильямс Ф.Дж., Слоэн Н.Дж.А. Теория кодов, исправляющих ошибки. Пер. с англ. М.: Связь, 1979. 744 с.
4. Grassl M. Bounds on the minimum distance of linear codes and quantum codes. Online available at http://www.codetables.de, 2007.
5. Форни Г.Д. Каскадные коды. Пер. с англ./ Под ред. С.И. Самойленко. М.: Мир, 1970. 205 с.
6. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 448 с.
7. Nili H. Fehlerwarscheinlichkeit und Geschwindigkeit hei der Ubertragung digitaler Informationen durch Gruppen – Codes, AEU, Heft 5, 1964.
8. Евстифеев Ю.С. Эффективная оценка корректирующей способности групповых кодов// Техника средств связи. Сер. ТПС, 1975. Вып.11. С.43-49.
9. Берлекэмп Э.Р. Алгебраическая теория кодирования. Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 477 с.
10. Элементы теории передачи информации. Под ред. Л. П. Пуртова. М.: Связь, 1972. 232 с.
11. Самойлов В.М. Обобщенная аналитическая модель канала с групповым распределением ошибок// Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР. Вып. 6, 1990. С.151-156.
12. Морозов В.Г., Пуртов Л.П., Замрий А.С. Обобщение экспериментальных данных по вероятности и показателю группирования ошибок// Техника средств связи. Сер. ТПС, 1981. Вып. 4. С.53-60.
13. Блох Э.Л., Попов О.В., Турин В.Я. Модели источника ошибок в каналах передачи цифровой информации. М.: Связь, 1971.
14. Турин В.Я. Передача информации по каналам с памятью. М.: Связь, 1977. 248 с.
15. Кухарев А.Д., Ледяков Б.П., Яковлев В.Г. Блочная модель канала, основанная на цепи Маркова. Техника средств связи. Сер. ТПС. Вып.5, 1990. С.35-41.

УДК 621.396

# СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ РАЗНОПРИОРИТЕТНОГО ДОСТУПА В ГРУППОВОМ СКРЫТОМ КАНАЛЕ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ

# METHOD OF ORGANIZING MULTI–PRIORITY ACCESS IN A GROUP COVERT CHANNEL WITH A VARIABLE BIT RATE

Анатолий Александрович Ерунов
*кандидат технических наук*
преподаватель кафедры сетей и систем связи космических комплексов
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13
Тел.: +7 (911) 289-22-05
E-mail: vka@mil.ru

Денис Владимирович Леванов
адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13
Тел.: +7 (812) 237-12-49
E-mail: vka@mil.ru

Андрей Сергеевич Севостьянов
адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13
Тел.: +7 (902) 250-32-64
E-mail: vka@mil.ru

**Аннотация**

В настоящее время наряду с криптографическими методами защиты информации широко применяются методы цифровой стеганографии. Увеличение абонентов, осуществляющих скрытый информационный обмен, требует поиска компромисса между скрытностью и пропускной способностью скрытых каналов передачи данных. Кроме того дополнительным ограничением при организации группового скрытого канала является переменная емкость контейнера, которая может привести к ухудшению качества обслуживания. В данной статье предложено актуальное решение увеличения эффективности использования ресурса группового скрытого канала передачи данных за счет перераспределения его пропускной способности с учетом приоритетов абонентов, основанное на применении технологии статистического мультиплексирования, при заданных ограничениях на качество обслуживания.

**Ключевые слова:** цифровая стеганография, скрытые каналы, стегоканалы, статистическое мультиплексирование, переменная скорость передачи данных в групповом скрытом канале.

**Summary**

The development of digital steganography methods in data protection requires a compromise between the hiddenness and throughput of hidden data transmission channels. Practical implementation of most methods of hidden data transmission in the video stream showed that the data rate in the hidden channel is variable and can lead to violation of the latent information exchange and deterioration of the quality of service. In this article, we proposed an actual solution to increase the efficiency of using the group hidden data channel resource by redistributing its bandwidth, taking into account subscriber priorities, based on the use of statistical multiplexing technology, given the constraints on the quality of service.

**Keywords:** digital steganography, hidden channels, stego channels, statistical multiplexing, variable data rate in a group hidden channel.

В современном мире происходит глобальное распространение мультимедийных технологий, которое становится неотъемлемой частью повседневной жизни. Ежедневно между организациями и частными клиентами происходит обмен конфиденциальной информацией, утечка которой грозит не только материальными убытками, но и нарушениями информационной безопасности. В этой связи первостепенной становится задача обеспечения безопасности передаваемых данных. Одним из способов обеспечения безопасности данных является использование методов цифровой стеганографии.

В большинстве известных методах цифро-

вой стеганографии осуществляется внедрение и передача скрываемой информации в некоторый объект, который не привлекает внимания. Данный объект в терминологии стеганографии принято называть контейнером [1,2]. При этом основным требованием для осуществления скрытой передачи является сохранения хорошего качества того объекта, в который осуществляется вложение. Присутствие же дополнительной информации не должно быть обнаружено. Такие файлы принято называть стегоконтейнерами, то есть заполненными контейнерами. В дальнейшем стегоконтейнер может передаваться по открытым каналам связи или находиться в общем доступе. Для встраивания и извлечения скрытой информации в контейнер используются стегосистемы. Большинство современных стегосистем, информация о которых находится в открытом доступе [1-7], ориентированы на организацию не более одного скрытого канала в одном контейнере. При этом под скрытым каналом понимают процесс обмена информацией, вкладываемой в контейнер без демаскирующих признаков, между парой абонентов. Очевидна перспективность исследований в направлении увеличения числа таких каналов в структуре контейнера [8]. Естественным развитием метода кодового уплотнения скрытых каналов в видеопотоке[8] являются исследования, направленные на возможность статистического мультиплексирования скрываемых данных с учетом переменной емкости стегоконтейнера [9-12]. Введение приоритетов при распределении скрытой пропускной способности уплотненного канала между абонентами определяется необходимостью обеспечения качества обслуживания, предъявляемого к скрываемым данным.

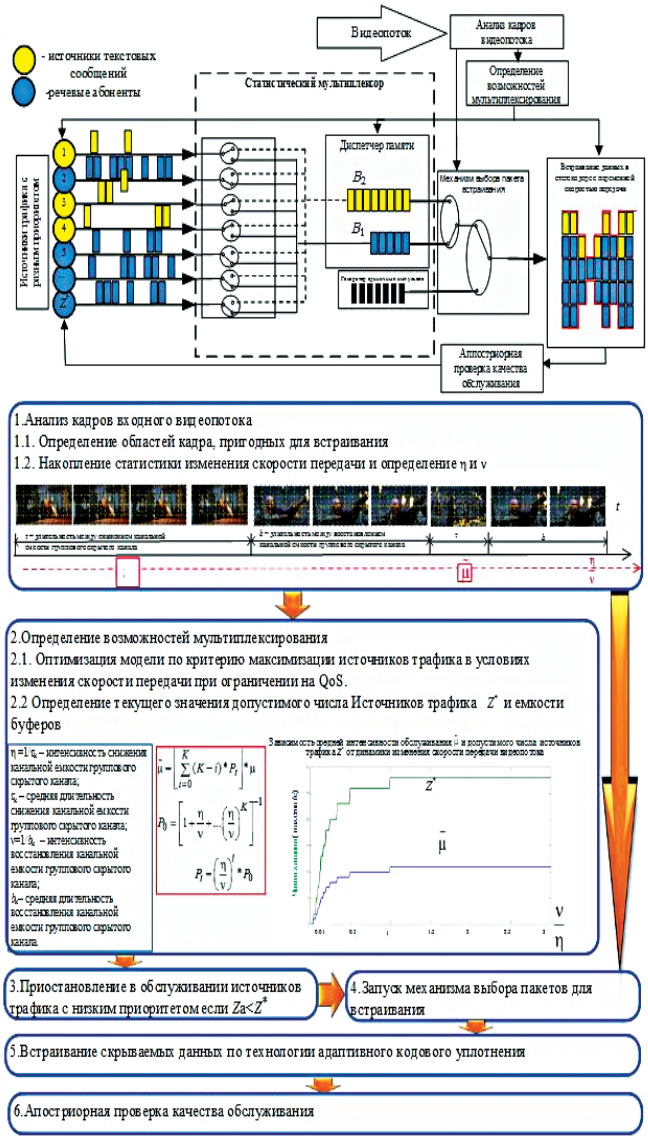



**Рис. 1.** Структурная схема разрабатываемого способа

В статье представлен новый способ организации разноприоритетного доступа в групповом скрытом канале с переменной скоростью передачи (*рисунок 1*), отличающийся от известных совместным использованием технологий статистического мультиплексирования и адаптивного кодового уплотнения. Кроме того в нем учтено изменение скорости передачи группового скрытого канала в процессе мультиплексирования информационных потоков.

В стегосистеме, организованной данным способом, разделяемым ресурсом между активными абонентами выступают элементы видео-контейнера (области видеокадра), которые пригодны для встраивания. Таким образом, достигается дополнительное уплотнение видео-контейнера скрываемыми данными за счет использования технологии статистического мультиплексирования.

Данный способ включает в себя выполнение следующих основных этапов:

1. Анализ кадров входного видеопотока.

1.1. Определение областей кадра, пригодных для встраивания.

1.2. Накопление статистики изменения скорости передачи и определение $\eta$ и $\nu$.

2. Рассчет вероятностно-временных характеристик обслуживания пакетов разного приоритета с использованием графовой модели статистического мультиплексирования.

2.1. Оптимизация графовой модели по критерию максимизации источников трафика в условиях изменения скорости передачи при ограничении на $Q_0S$.

2.2. Определение текущего значения допустимого числа источников трафика $Z^*$ и емкости буферов.

3. Приостановление в обслуживании источ-

ников трафика с низким приоритетом если число активных абонентов $Z_a$ больше допустимого $Z$.

4. Запуск механизма выбора пакетов для встраивания.

5. Встраивание скрываемых данных по технологии адаптивного кодового уплотнения.

6. Апостериорная проверка качества обслуживания.

Оценивание качества обслуживания осуществляется в соответствии с существующей методикой. Данная методика включает в себя следующие этапы:

1. Построение графовой модели статистического мультиплексирования информационных потоков группового скрытого канала с переменной скоростью передачи. (*рисунок 2*).

2. Составление системы на основе уравнений баланса.

3. Решение системы алгебраических уравнений.

4. Расчет вероятностно-временных характеристик процесса обслуживания пакетов с разным приоритетом:

- вероятность потери пакетов с высоким и низким приоритетом:
- средняя длина очереди пакетов в памяти буфера стегокодера с разным приоритетом в обслуживании;
- среднее время задержки пакетов с разным приоритетом в памяти буфера мультиплексора до начала передачи;
- среднее время задержки пакетов с разным приоритетом при обслуживании в мультиплексоре;
- среднее время задержки пакетов с разным приоритетом при обслуживании в стегокодере.

5. Решение оптимизационной задачи выбора емкости буфера и максимизации источников трафика в условиях изменения скорости пере-

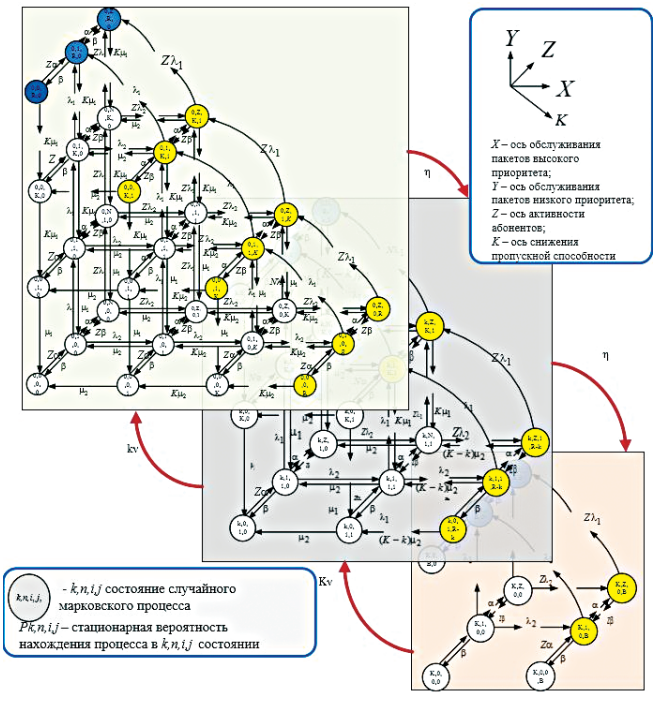



**Рис. 2.** Графовая модель статистического мультиплексирования информационных потоков группового скрытого канала с переменной скоростью передачи

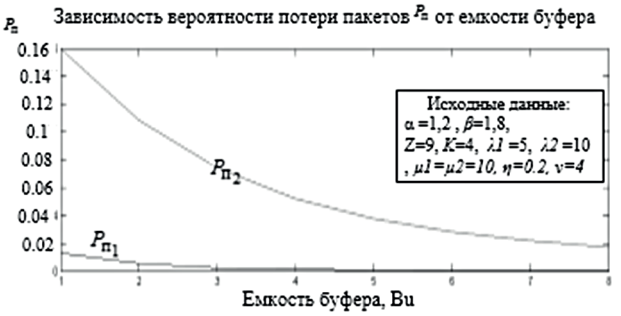



**Рис.3.** Зависимость вероятности потери пакетов от емкости буфера мультиплексора

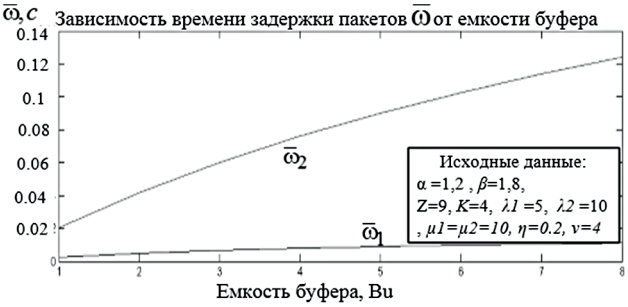



**Рис. 4.** Зависимость времени задержки пакетов в буфере от его емкости

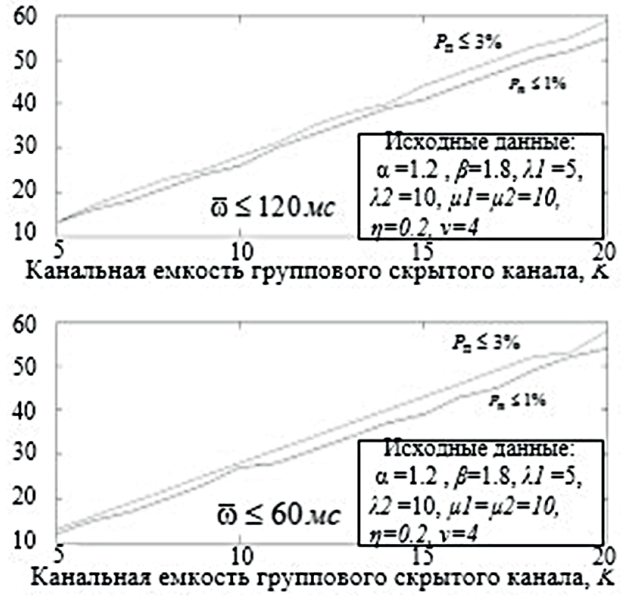



**Рис. 5.** Зависимость допустимого числа источников трафика Z от канальной емкости группового скрытого канала K

дачи при ограничении на $Q_0 S$ представлена на *рисунках 3-5*.

Таким образом, применение разработанного способа организации разноприоритетного доступа в групповом скрытом канале с переменной скоростью передачи , позволяет:

- учесть переменную скорость передачи в групповом скрытом канале,
- обеспечить требования, предъявляемые к качеству обслуживания абонентов скрытого информационного обмена;
- повысить число формируемых скрытых каналов при обеспечении требований к качеству обслуживания и скрытности встраивания. Достигаемый выигрыш составляет до 2,8 раз по сравнению со средней канальной емкостью.

**Литература**

1. Грибунин В.Г., Оков И.Н., Туринцев И.В. Цифровая стеганография. М.: Солон-Пресс, 2002. 272 с.

2. Абазина Е.С., Ерунов А.А. Сравнительный анализ и классификация методов цифровой и компьютерной стеганографии и перспективные направления ее развития/ Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского, 2016. Вып. 655. С.5-16.

3. Koch E., Zhao J. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling// IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, 1995. Pp.123-132.

4. Fridrich J. Combining low-frequency and spread spectrum watermarking // Proceedings of the SPIE Conference on Mathematics of Data/ Image Coding. Compression and Encryption, 1998. Vol. 3456. Pp.2-12.

5. Жгун А.В. Модель скрытой передачи информации в каналах связи: дисс. … канд. ф.-мат. наук по спец. 05.13.18. В. Новгород: НовГУ, 2003. 187 с.

6. Небаева К.А. Разработка необнаруживаемых стегосистем для каналов с шумом: дис. … канд. тех. наук по спец. 05.12.13. СПб.: СПбГУТ, 2014. 176 с.

7. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: МК-Пресс, 2006. 283 с.

8. Абазина Е.С. Метод кодового уплотнения скрытого канала при передаче видеоданных// Системы управления, связи и безопасности, 2015. № 3. С.14-42. URL. http://journals.intelgr.com /sccs/20153/html (дата обращения 20.03.2016).

9. Ерунов А.А. Результаты моделирования асинхронного мультиплексирования скрываемых данных в видеопотоке// Известия Института инженерной физики, 2017. №2(44). С.17-20.

10. Абазина Е.С., Ерунов А.А. Применение асинхронного мультиплексирования скрытых каналов передачи данных в одном видеопотоке систем спутниковой связи// Труды учебных заведений связи, 2017. Т.3. №2. С.5-15.

11. Ерунов А.А. Модель асинхронного мультиплексирования скрываемых данных в видеоконтейнере переменной емкости// Информация и космос, 2017. №2. С.81-87.

12. Ерунов А.А., Цветков К.Ю., Абазина Е.С. Имитационная модель скрытого канала с кодовым уплотнением и переменной емкостью видео-контейнера// Свидетельство о регистрации электронного ресурса №22629, 2017.

УДК 621.396

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОЙ СТЕГАНОГРАФИИ В ИНТЕРЕСАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

# APPLICATION OF DIGITAL STEGANOGRAPHY TECHNOLOGIES TO ENSURE THE SUSTAINABILITY OF CONTROL SYSTEMS

Кирилл Юрьевич Цветков
*доктор технических наук, профессор*
профессор кафедры сетей и систем связи космических комплексов
ВКА имени А.Ф.Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (911) 794-44-92
E-mail: vka@mil.ru

Александр Геннадьевич Шадрин
*кандидат технических наук*
доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов
ВКА имени А.Ф.Можайского

Евгения Сергеевна Абазина
*кандидат технических наук*
преподаватель кафедры сетей и систем связи космических комплексов
ВКА имени А.Ф.Можайского

Вячеслав Анатольевич Рыженков
*кандидат технических наук*
начальник управления заказов специальных средств
МО РФ
Москва
Тел.: +7 (926) 155-74-09

**Аннотация**
В статье представлен подход резервирования каналов связи, функционирующих в интересах систем управления, и состоящий в создании каналов скрытого информационного обмена с применением методов цифровой стеганографии, основной целью которой является сохранение в тайне самого факта передачи информации. Представленный подход позволяет повысить устойчивость систем управлении.
**Ключевые слова:** цифровая стеганография, резервирование системы управления, стегоканалы.

**Summary**
There is an alternative approach to creating control systems backup channels in the paper. We propose to consider the possibility of deployment of hidden channels using digital steganography methods. The main digital steganography purpose is information exchange hiding from unauthorized users of the telecommunications system. Such approach allows increasing the stability of the telecommunications control system.
**Keywords:** digital steganography, control systems backup channels, stego-channels.

## Введение

Научно-технический прогресс в области компьютерных и телекоммуникационных технологий характеризуется глобальным внедрением его результатов во все сферы жизни и деятельности. Несомненным преимуществом возрастающего применения инфокоммуникационных достижений является возможность дистанционного управления, а также автоматизация этого процесса, в отношении всех возможных комбинаций субъект управления (человек, машина) – объект управления (группа людей, техническое устройство, производственные процессы). Очевидным является и недостаток тотальной интеграции инфокоммуникаций с управлением, состоящий в необходимости применения мер по обеспечению безопасности систем управления, направленных на предотвращение преднамеренных или непреднамеренных воздействий, мешающих корректному функционированию систем управления. Материальными средствами систем управления являются телекоммуникационное оборудование и линии связи, компьютеры, операционные системы, аппаратно-программные и программные продукты, каждый из которых содержит уязвимости безопасности. В соответствии стандартом IEC 61511:2016, составившим основу ГОСТ МЭК 61511-1-2018 [1] безопасность промышленных систем управления (Industrial Control System, ICS) включает в себя безопасность диспетчерского управления и сбора данных, безопасность распределенных систем управления,

безопасность систем на базе программируемых логических контроллеров, и в широком смысле классифицируется как кибербезопасность. В соответствии с формулировкой, представленной в [2-4], кибербезопасностью (защищенностью) называют способность объекта функционировать при воздействии на него внутренних и внешних негативных факторов различной природы, и определяющаяся совокупностью инженерно-технических средств защиты материальных и информационных ресурсов данного объекта, а также состоянием организационно-технических мероприятий, реализуемых в отношении этого объекта. В работе [5] представлен обзор наиболее типичных уязвимостей, характерных для систем управления. Среди уязвимостей, создающих предпосылки внешних угроз и атак, особого внимания заслуживают те, которые связаны с использованием беспроводных сетей связи, технологий удаленного доступа, как наиболее подверженных действиям со стороны злоумышленников. Выбор радиоканалов в качестве среды обмена управляющей информацией свидетельствует об отсутствии физической возможности применения более защищенных проводных систем связи. В этом случае обеспечение кибербезопасности сводится к использованию выделенных каналов связи, использованию криптографических методов, туннелированною при организации сеансов связи [4]. Однако в случае, когда злоумышленник преследует цель срыва цикла управления, ему нет необходимости получать доступ к передаваемой по каналам управления информации. В этом случае, применяемые меры становятся мало результативны. Традиционным выходом в представленной ситуации является создание резервных каналов управления для обеспечения требуемой устойчивости телекоммуникационной сети.

### Применение технологий цифровой стеганграфии при обеспечении устойчивости систем управления

Обычно при использовании беспроводных сетей при организации управления используются радиоканалы прямой видимости, с шириной полосы частот, измеряемой десятками и сотнями килогерц, мощность излучаемых сигналов составляет десятки милливатт при использовании каналов сотовой сети, для радиорелейных систем эти показатели больше и определяются скоростью передачи управляющей информации. В случае, если принципы организации резервных каналов управления не отличаются от основных, возможности по обеспечению продолжительного функционирования такой системы управления в условиях внешних атак минимальны.

В качестве альтернативного подхода к созданию резервных каналов систем управления в работе предлагается рассмотреть возможность заблаговременного развертывания скрытых каналов с применением методов цифровой стеганографии, основная цель применения которых заключается в сокрытии информационного обмена от несанкционированных пользователей телекоммуникационной системы. Как правило, заявленная цель достигается за счет модификации избыточных элементов открыто передаваемых сообщений элементами сообщений, требующих сокрытия. Основное противоречие, требующее разрешения при организации стегоканалов (в смысле сокрытия информационного обмена от третьих лиц), состоит в поиске рационального компромисса между стегоскрытностью сообщений, подлежащих сокрытию и достоверностью и своевременностью, как скрываемых стегосообщений, так и данных, используемых для сокрытия. Под стегоскрытностью в соответствии с терминологией, систематизированной в [6], в статье понимается способность обеспечивать сокрытие факта, времени и места передачи стегосообщений и их предназначения, а также противостоять вводу ложной информации. В работах [6-8] представлены технические аспекты реализации нескольких стегоканалов в одном открытом канале передачи видеоданных. Основной принцип стеганографической передачи информации определяет выбор видеоданных в качестве объекта для сокрытия, как наиболее избыточных.

Результаты исследований [7-9] позволяют утверждать, что в одном открытом видеоканале со скоростью передачи информации от 2 Мбит/с до 8 Мбит/с возможно организовать до 56 парциальных стегоканалов со скоростью передачи информации не менее 1,2 кбит/с при достоверности, оцениваемой вероятностью ошибочного приема на бит, не хуже $10^{-3}$ (*таблица 1*). При этом существует возможность адаптивного изменения характеристик формируемого стегоканала в зависимости от того, какая из них выбирается в качестве основной при обеспечении заданной стегоскрытности: скорость передачи информации в парциальном стегоканале, количество парциальных стегоканалов или достоверность приёма информации в стегоканале.

Представленные характеристики стегоканалов определяют возможность заблаговременного развертывания резервной системы скрытого управления. Основой такой системы может стать постоянно функционирующие сети спутниковой связи, предоставляющие услуги телевизионного вещания (ТВ) и широкополосный доступ в Интернет (ШДИ), развернутые на всей территории

страны и за ее пределами. Анализ предоставления услуг спутникового телевидения одним из лидирующих провайдеров в этой сфере [10] показал, что среднее число телевизионных каналов в полосе частот луча КА ТВ составляет 200 каналов, 170 из которых транслируются с качеством HD, остальные – с качеством FullHD.

Это определяет возможность формирования стегоканала с минимальной скоростью передачи управляющей информации порядка 70 кбит/с в каждом канале. Обобщенная схема организации предлагаемой системы скрытого управления представлена на *рисунке 1*.

Система скрытого управления предполагает формирование составного стегоканала, включающего в себя звенья следующих участков:

- субъект управления (например, группа управления производственными процессами) – космический аппарат (КА) связи РФ провайдера услуг спутниковой связи: стегоканал (совместно (или без) с криптозащитой) в структуре открытых видеоданных, передаваемых по спутниковому каналу связи;
- КАС РФ – центральная земная станция (ЦЗС) РФ провайдера услуг спутниковой связи: стегоканал (криптоканал) в структуре открытых видеоданных при их передаче по спутниковому каналу связи;
- ЦЗС РФ – ЦЗС РФ: стегоканал в структуре потокового телевидения качества HD и выше или в структуре открытых видеоданных;
- ЦЗС РФ – КАС РФ с областью облуживания абонентов в районе субъекта управления: стегоканал в структуре спутникового потокового телевидения качества HD и выше или в структуре открытых видеоданных;
- КА связи РФ провайдера услуг спутниковой связи: стегоканал (криптоканал) в структуре открытых видеоданных, передаваемых по спутниковому каналу связи – объект управления (например, производственные процессы).

Результаты исследований, представленные в работе [11], свидетельствуют, что временные издержки при формировании стегоканала, а также при встраивании и извлечении скрываемой информации в видеоданных, незначительны для современных средств цифровой обработки сигналов, и составляют не более 100 мс.

Таким образом, основной платой за формирование системы скрытого управления с применением стегоканалов являются временные издержки, определяемые распространением сигнала от объекта управления к КА РФ и обратно на обоих интервалах, составляющих спутниковый радиоканал. Задержка сигнала на распространение составляет порядка 500 мс.

Суммарная задержка на передачу команд управления при таком подходе не превышает 1 секунды. Анализ современных тенденций в области развития спутниковых систем глобального доступа в интернет, анонсированный корпора-

**Таблица 1**

Взаимосвязь характеристик стегоканалов и качества видеоданных

| Вид открыто передаваемой информации | MPEG-2 (подвижные видеоданные) | | | | | JPEG (неподвижные видеоданные) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Уровни качества | Низкий | Основной | Высокий | | | Низкий | Основной | Высокий | |
| Размер кадра | 720x576 | 720x576 | 720x576 | 1440x1150 | | 352x288 | 720x576 | 1440x1150 | |
| Частота смены кадров открытого канала видеоданных, Гц | 25 | 30 | 40 | 40 | | - | - | - | |
| Скорость передачи открытого канала видеоданных | 2 | 4 | 6 | 8 | | 2 | 4 | 8 | |
| Пропускная способность группового стегоканала, кб/с | 8,53 | 10,2 | 13,65 | 68,27 | 27,3 | 1,024 | 4,096 | 20,480 | 10,578 |
| Число парциальных стегоканалов | 7 | 8 | 11 | 56 | 22 | 1 | 3 | 16 | 8 |
| Достоверность скрываемых данных, $p_{ош}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-9}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-3}$ | $10^{-9}$ |

Скорость передача информации по парциальному стегоканалу - не менее 1,2 кбит/с при достоверности, оцениваемой вероятностью ошибочного приема бит не хуже $10^{-3}$

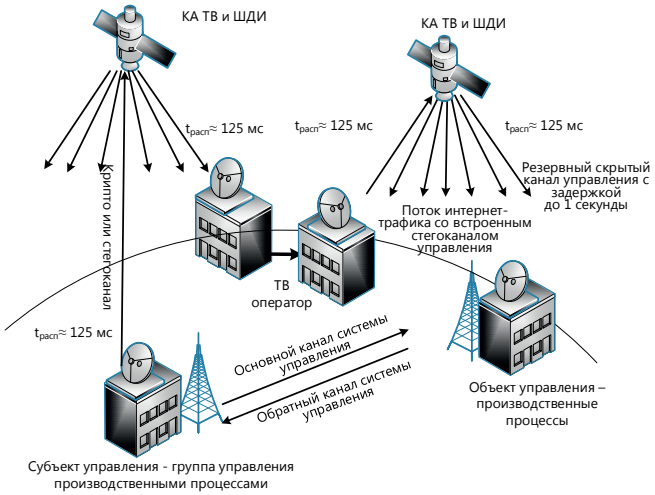



**Рис. 1.** Обобщенная схема организации резервной системы скрытого управления

циями OneWeb [12], StarLink [13], Сфера [14], а также уже функционирующей системой Iridium Next [15], позволяет предполагать, что рассчитанные временные издержки будут сокращаться, а развитие данных систем – способствовать реализации предлагаемой системы скрытого управления.

### Оценка качества связи при реализации предлагаемой структуры перспективной системы скрытого управления

Развертывание скрытого канала управления с применением методов цифровой стеганографии характеризуется повышением устойчивости телекоммуникационной системы, а, следовательно, и системы управления, и может быть оценено вероятностью связности сети [16]. Выигрыш от применения резервирования скрытым каналом управления рассчитан при сравнении со случаями без резервирования и с резервированием каналом связи аналогичными средствами.

Схема организации одного информационного направления основными средствами спутниковой связи, с резервированием однотипными средствами, с резервированием скрытыми каналами представлены на *рисунке 2*.

Показателем устойчивости канала связи спутниковой связи является вероятность связности направления связи (*P*). Связность определяется, как минимальное число независимых путей для обеспечения передачи информации между двумя любыми узлами сети.

Для информационного направления, организованного основными средствами спутниковой связи, вероятность связности информационного направления *P*осн может быть рассчитана:

$$P_{осн} = p_{ЗС\text{-}КА} * p_{КА\text{-}ЗС} = p^2, \quad (1)$$

где $p_{ЗС\text{-}КА}$, $p_{КА\text{-}ЗС} = p$ – вероятность работоспособного состояния интервала ЗС $11_{осн}$-КА, КА-ЗС12осн, примем их равными.

Тогда вероятность отказа информационного направления $Q_{осн}$, организованного основными средствами спутниковой связи ЗС $11_{осн}$, $ЗС12_{осн}$:

$$Q_{осн} = 1 - p^2$$

Для информационного направления, организованного основными средствами спутниковой связи ЗС $11_{осн}$, $ЗС12_{осн}$, с резервированием аналогичными средствами ЗС $21_{рез}$, ЗС $22_{рез}$ вероятность связности информационного направления $P^{ИН}_{рез}$ может быть рассчитана:

$$P^{ИН}_{рез} = 1 - Q^{ИН}_{рез},$$

где $Q^{ИН}_{рез}$ – одновременный отказ в основной (ЗС $11_{осн}$ – $ЗС12_{осн}$) и резервной (ЗС $21_{рез}$ – ЗС $22_{рез}$) спутниковых радиолиний одновременно, т.е.

$$Q^{ИН}_{рез} = Q_{осн} * Q_{рез},$$

где $Q_{осн}$ – вероятность отказа основной спутниковых радиолинии, организованного средствами спутниковой связи;

$Q_{рез}$ – вероятность отказа резервной спутниковых радиолинии.

Тогда для случая с резервированием комплектом однотипных средств получаем $Q_{рез}=Q_{осн}$.

Учитывая, что вероятности работоспособного состояния интервалов ЗС-КА, КА-ЗС при использовании с однотипных средств равны

$$p^{рез}_{КА\text{-}ЗС} = p^{рез}_{ЗС\text{-}КА} = p^{осн}_{КА\text{-}ЗС} = p^{осн}_{ЗС\text{-}КА} = p,$$

получаем формулу для расчета отказа информационного направления:

$$Q_{рез} = Q_{осн} = (1 - p^2)^2.$$

Тогда вероятность связности информационного направления *P*ИНрез для случая с резервированием комплектом однотипных средств получаем:

$$P^{ИН}_{рез} = 1 - (1 - p^2)^2. \quad (2)$$

Для случая с резервированием скрытым каналом в видеопотоке расчет отказа $Q^{ИН}_{стг}$ информационного направления может быть выполнен по формуле:

$$Q^{ИН}_{стг} = Q_{стг} * Q_{осн} = (1 - p^2) * (1 - p_{стг}^2),$$

где *p*стг – вероятность работоспособного состояния интервалов

$$ЗС\ 31_{стг} - КА_{стг},\ КА_{стг}\text{-}ЗС\ 32_{стг},$$

при организации скрытых каналов в видеопотоке.

Тогда вероятность связности информационного направления *P*ИНстг с резервированием скрытым каналом в видеопотоке может быть рассчитана по формуле:

$$P^{ИН}_{стг} = 1 - (1 - p^2) * (1 - p_{стг}^2). \quad (3)$$

В соответствии с [16] в сетях электросвязи общего пользования основные направления связи классифицируют на три категории в зави-

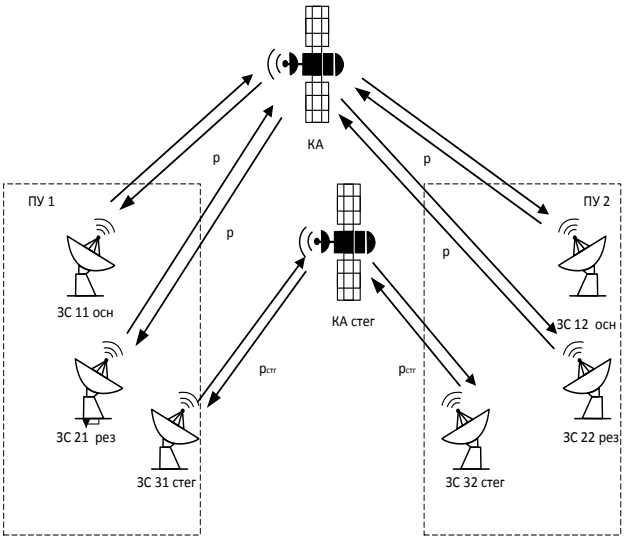



**Рис. 2.** Схема организации одного информационного направления основными средствами спутниковой связи, с резервированием однотипными средствами, с резервированием скрытыми каналами в видеопотоке

симости от значимости (важности) выделяемых каналов в интересах спецпотребителей. В настоящей статье проведён расчёт для 1 категории пользователей с вероятностью устойчивости, равной 0,9.

Для информационного направления, организованного основными средствами спутниковой связи, без резервирования в соответствии с формулой (1) вероятность связности информационного направления равна $P_{осн}=0,9^2=0,81$.

Вероятность связности информационного направления $P^{ИН}_{рез}$ для случая с резервированием комплектом однотипных средств по формуле (2) получаем $P^{ИН}_{рез}=0,96$.

В случае, когда резервирование осуществляется путём создания скрытых каналов, вероятность ее работоспособного состояния будет больше, что обосновано сохранением в тайне от злоумышленника самого факта передачи управляющей информации, определение точных ее значений представляет самостоятельный интерес. Предположим, что $p$стг=0,999, тогда вероятность связности информационного направления $P^{ИН}_{стг}$ с резервированием скрытыми каналами в видеопотоке в соответствии с формулой 3 имеет значение $P^{ИН}_{стг}= 0,9996$.

Таким образом, заблаговременное резервирование основных каналов управления скрытыми каналами с применением методов цифровой стеганографии, характеризующегося меньшим значением вероятности обнаружения злоумышленника, позволяет повысить устойчивость телекоммуникационной системы и системы управления.

**Литература**

1. ГОСТ Р МЭК 61511-1-2018 Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов. Часть 1. Термины, определения и технические требования (IEC 61511-1:2016 + Corr:2016, IDT), М.: Стандартинформ, 2018. 74 с.
2. ГОСТ Р МЭК 62443-2-1-2015 Сети коммуникационные промышленные. Защищенность (кибербезопасность) сети и системы. Часть 2-1. Составление программы обеспечения защищенности (кибербезопасности) системы управления и промышленной автоматики // IEC 62443-2-1:2010 Industrial communication networks–Network and system security–Part 2-1: Establishing an industrial automation and control system security program (IDT). М.: Стандартинформ, 2015. 135 с.
3. ГОСТ Р 56498-2015 Промышленные коммуникационные сети. Защищенность (кибербеэопасность) сети и системы. Часть 3. Защищенность (кибербезоласность) промышленного процесса измерения и управления // IEC/PAS 62443-3:2008 «Industrial communication networks–Network and system security—Part 3: Security for industrial process measurement and control»). М.: Стандартинформ, 2015. 45 с.
4. ГОСТ Р 56875-2016 Информационные технологии системы безопасности комплексные и интегрированные. Типовые требования к архитектуре и технологиям интеллектуальных систем мониторинга для обеспечения безопасности предприятий и территорий. М.: Стандартинформ, 2018. 39 с.
5. Сунил Додди. Основы безопасности индустриальных систем управления // пер: Рентюк В. // CONTROL ENGINEERING РОССИЯ #3 (75), 2018, с. 63-65. URL: https://controleng.ru/wp-content/uploads/7563.pdf (дата обращения 23.06.2020).
6. Абазина Е.С., Цветков К.Ю. Концептуальная модель взаимодействия стегосистем передачи данных в составе эталонной модели взаимодействия открытых систем // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2019. Вып. 668. С.70-80.
7. Цветков К.Ю., Ерунов А.А., Абазина Е.С. Алгоритм кодового уплотнения скрытых каналов с учетом приоритетов абонентов // Известия Института инженерной физики, 2016. №4(42). С.25-31.
8. Абазина Е.С. Формирование стеганографического канала с кодовым уплотнением на основе двумерных нелинейных сигналов // Вопросы радиоэлектроники в сфере техники телевидения, 2015. №1. С.15-26.
9. Абазина Е.С. Метод скрытой передачи информации с кодовым уплотнением в видеоданных // Информация и космос, 2014. №1. С.33-38.
10. Частоты каналов три-колор ТВ: официальный сайт провайдера услуг связи [Электронный ресурс]. Режим доступа: http:tricolortv.info/spravochnik/tehno/128-chastoty (дата обращения 27.01.2020).
11. Абазина Е.С., Ерунов А.А., Коровин В.М. Вычислительная сложность алгоритмов формирования стегоканала с кодовым уплотнением в видеопотоке // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2018. Вып. 665. С.35-45.
12. Пехтерев С. Низкоорбитальные спутниковые группировки: OneWEB. 13.12.2018. URL: https://www.cableman.ru/article/nizkoorbitalnye-sputnikovye-gruppirovki-oneweb (дата обращения 23.06.2020).
13. Пехтерев С. Низкоорбитальные спутниковые группировки: StarLin. 17.12.2018. URL: https://www.cableman.ru/article/nizkoorbitalnye-sputnikovye-gruppirovki-starlink (дата обращения 23.06.2020).
14. Официальный сайт ТАСС: Российская глобальная спутниковая система связи «Эфир» / «Сфера». Досье. URL: https://tass.ru/info/5273277 (дата обращения 23.06.2020).
15. Макаренко С.И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности, 2018. №4 URL: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/01-Makarenko.pdf (дата обращения 23.06.2020).
16. ГОСТ Р 53111-2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки.

УДК 621.39

# ПЕРЕДАЧА ЗАПРОСОВ В РЕЖИМЕ ДВОЙНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАПРОСНОГО КАНАЛА ПО АЛГОРИТМУ ТАКТИРОВАННОГО СЛУЧАЙНОГО МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА (СТРАТЕГИЯ 2)

# TRANSMITTING REQUESTS IN THE DUAL–USE MODE OF THE REQUEST CHANNEL USING THE ALGORITHM OF TACTILE RANDOM MULTIPLE ACCESS (STRATEGY 2)

Александр Иванович Косяк
*кандидат технических наук*
старший научный сотрудник
«Управление АСУ и связи»
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93
E-mail: KosyakAI@iifmail.ru

Дмитрий Вячеславович Донцов
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

Сергей Николаевич Шиманов
*почетный работник ВПО РФ*
*почетный радист РФ*
*доктор технических наук, профессор*
ведущий научный сотрудник
«Управление АСУ и связи»
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

**Аннотация**

В статье рассматривается процесс передачи запросов в режиме двойного использования запросного канала по алгоритму случайного множественного доступа. Указывается на особенности передачи запросов при двойном использовании запросного канала, приводится математическое описание исследуемого процесса, сравнительный анализ результатов работы алгоритма с предложенным ранее. Указывается на то, что сформированные аналитические модели являются основой методики определения параметров двойного использования запросного канала, позволяющей контролировать понижение оперативности передачи запросов при организации сбора телеметрических данных.

**Ключевые слова:** случайный множественный доступ, запросный канал, централизованные системы связи, конечные цепи Маркова.

**Summary**

The article discusses the process of transmitting requests in the mode of double use of the request channel using the random multiple access algorithm. The specifics of the transmission of requests with the double use of the request channel are indicated, a mathematical description of the process under study, a comparative analysis of the results of the algorithm with the previously proposed one. It is pointed out that the generated analytical models are the basis of the methodology for determining the parameters of the double use of the request channel, which makes it possible to control the decrease in the efficiency of request transmission when organizing the collection of telemetric data.

Keywords: random multiple access, interrogation channel, centralized communication systems, Markov end chains

В [1] приведен способ передачи запросов на установление соединения по алгоритму тактированного случайного множественного доступа (S-Aloha) [2,4] по запросному каналу связи, функционирующему в режиме двойного использования (для передачи запросов и для передачи телеметрии). Суть предложенной стратегии состоит в переходе мобильного абонента (МА) при генерации запроса на периоде передачи телеметрии в состояние повторной передачи. Альтернативным вариантом исследованному подходу служит переход МА в состояние первичной передачи с последующим переходом в состояние повторной передачи в случае отрицательного результата.

Блок-схема алгоритма передачи запроса по предложенной стратегии представлена на *рисунке 1*.

Цветом на *рисунке 1* выделены блоки, не входящие в стандартный (известный) алгоритм S-Aloha [2, 4].

В [1] указано, что относительно передачи запросов работа запросного канала в режиме двойного использования характеризуется «про-

стоем» (при передаче телеметрии на длительности *lд* слот) и «работой» (при передаче запросов на длительности *lз* слот). Частота «простоя» и «работы» характеризуется коэффициентом целевого использования запросного канала (*Кц.и.*). На этапе «работы», когда передаются запросы можно выделить два типа шагов, характеризуемых разной длительностью, в течении которой проводилась генерация запросов с интенсивностью $\lambda_0$. Приведенная особенность наглядно иллюстрируется на временной диаграмме, представленной на *рисунке 2*.

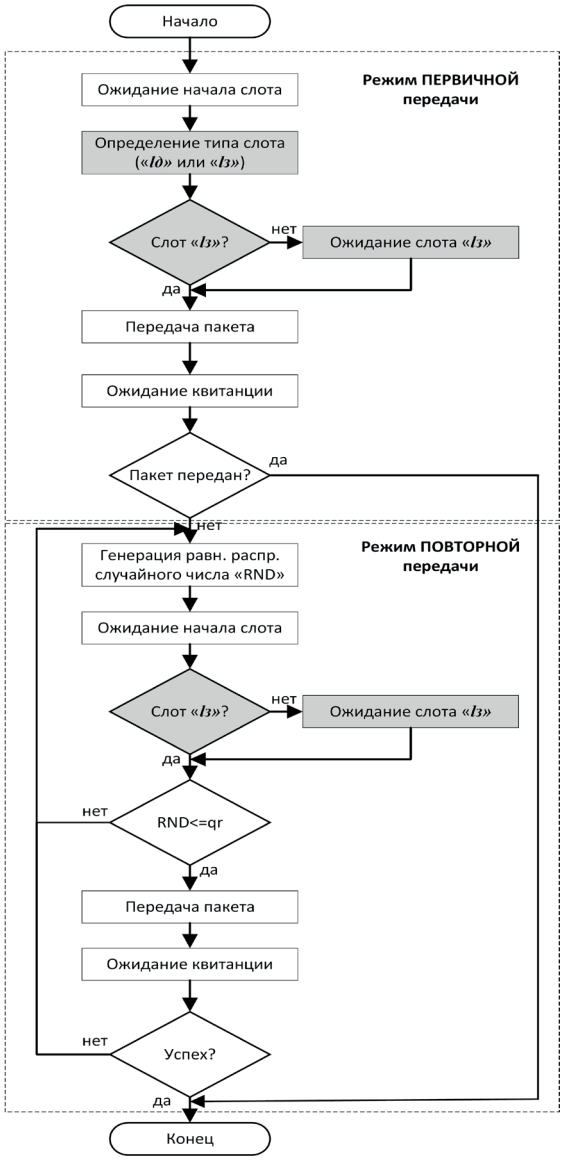



**Рис. 1.** Блок-схема алгоритма передачи запроса в режиме двойного использования запросного канал

На *рисунке 2* изображены кадры, представляющие собой шаги переходов исследуемого процесса, пронумерованные с момента начала режима двойного использования запросного канала.

Из представленного рисунка видно, что в момент начала четвертого порядкового слота, передачу начнут мобильные абоненты, передающие запросы (МА(з)) и сгенерировавшие запросы в течении прошлого кадра передачи запросов (соответствующего последнему слоту монопольного использования запросного канала) и кадров, в течении которых в слотах запросного канала проводилась передача телеметрии (порядковый слот №1, 2 и 3). Такая же ситуация характерна и для слота с номером 11. В слоте №11 будут переданы запросы, сгенерированные в течении 7-го, 9-го, 9-го и 10-го кадров. В момент начала 5-го, 6-го, 7-го, 12-го слота и т.д. будут первично передаваться запросы, сгенерированные на длительности предшествующего кадра.

Таким образом, имеют место быть два типа шагов передачи запросов с разными интервалами генерации запросов, а соответственно разными интенсивностями генерации запросов:

$$\Delta\tau=\{\Delta\tau_1, \Delta\tau_2\}, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_1$, $\Delta\tau_2$ – длительность генерации запроса для шага первого и второго типа соответственно.

Длительность генерации запроса для шага переходов передачи запросов первого типа определяется на основе следующего аналитического выражения:

$$\Delta\tau_1=(l_д+1)\tau_{кадр}, \quad (2)$$

где $\tau_{кадр}$ – размер кадра.

Длительность генерации запроса для шага переходов передачи запросов второго типа равна длине кадра:

$$\Delta\tau_2=\tau_{кадр}. \quad (3)$$

Расчет интенсивностей генерации запросов на кадр [3] для каждого из типов шагов проводится на основе аналитических выражений,

**Рис. 2.** Временная диаграмма, поясняющая формирование интенсивности генерации запросов для каждого из шагов передачи запросов в режиме двойного использования запросного канала

приведенных ниже:

$$\lambda_{a1}=\lambda_0\Delta\tau_1, \lambda_{a2}=\lambda_0\Delta\tau_2, \quad (4)$$

где $\lambda_{a1}$, $\lambda_{a2}$ – интенсивности генерации запросов для шагов передачи запросов соответственно первого и второго типа.

Разделение шага на два типа, для каждого из которых характерны свои интенсивности генерации запросов, приводит к появлению соответствующих двух вероятностей генерации запроса:

$$q_{a1}=1-e^{-\lambda_0\Delta\tau_1}, \quad (5)$$

$$q_{a2}=1-e^{-\lambda_0\Delta\tau_2}, \quad (6)$$

где $q_{a1}$ – вероятность генерации запроса на шаге типа «1»;

$q_{a2}$ – вероятность генерации запроса на шаге типа «2».

Исходя из логики следования шагов ясно, что на периоде двойного использования запросного канала ($L$) число шагов типа «1» будет равно одному ($n_{ш1}=1$), а число шагов типа «2» будет равно:

$$n_{ш2}=l_з-1. \quad (7)$$

Общее число шагов передачи запросов разного типа на периоде L будет равно:

$$n_ш=n_{ш1}+n_{ш2} \quad (8)$$

Ввиду стохастичности моделируемого процесса перейдем к вероятностному описанию порядка следования типов шагов. Вероятность возникновения шага передачи запроса типа «1» ($P_{ш1}$) на периоде двойного использования КС в течении $l_З$ слот КС будет определяться выражением:

$$P_{ш1}=n_{ш1}/n_ш. \quad (9)$$

Вероятность шага «2»:

$$P_{ш2}=n_{ш2}/n_ш. \quad (10)$$

Состояние процесса так же, как и для стратегии, рассмотренной ранее, [1] можно охарактеризовать числом МА, находящихся в режиме повторной передачи:

$$S^{KC}=\{S_0,S_1,\ldots,S_N\}, \quad (11)$$

где $N$ – общее число МА, участвующих в передаче запроса по запросному каналу связи.

Для описания событий, сопровождающих смену состояний рассматриваемого процесса рассмотрим элементарные события, возникающие в процессе работы запросного канала.

Рассмотрим событие, состоящее в генерации $i$-м числом МА запросов, находящихся в режиме первичной генерации, при этом число МА, находящихся в режиме повторной передачи равно $n$. Данное событие возможно тогда и только тогда, когда $i$ МА, из $(N\text{-}n)$ МА, находящихся в режиме первичной генерации сгенерирую запрос, а остальные $(N\text{-}n\text{-}i)$ МА, находящиеся в режиме первичной генерации запрос не сгенерируют. Рассмотренные события генерации и не генерации запросов заданным числом МА являются независимыми. Вероятность того, что $i$ МА сгенерирую запрос равна $q_{a1}$. Вероятность того, что $(N\text{-}n\text{-}i)$ не сгенерируют запрос, равна $(1\text{-}q_a)^{N-n-i}$. Пользуясь теоремой произведения независимых событий и правилом комбинаторики, вероятность первичной генерации $i$-м числом МА запросов, в условиях, когда $n$ МА находятся в режиме повторной передачи равна: для шага «1»:

$$Q_{a1}(i,n)=C_i^{N-n}(1-q_{a1})^{N-n-i}q_{a1}^i. \quad (12)$$

Для шага «2»:

$$Q_{a2}(i,n)=C_i^{N-n}(1-q_{a2})^{N-n-i}q_{a2}^i, \quad (13)$$

где $C_i^j$ – биномиальный коэффициент, представляющий собой число сочетаний из $i$ по $j$ и определяемый выражением:

$$C_i^j=\begin{cases}\dfrac{i!}{j!(i-j)!} & для\ j\le i\\ 0 & для\ j>i\end{cases}. \quad (14)$$

Рассмотрим событие, при котором $i$ МА, находящиеся в режиме повторной передачи передадут запроса в запросный канал. Данное событие возможно, когда $i$ из $n$ МА, находящихся в режиме повторной передачи, передадут пакет в КС, а остальные $(n\text{-}i)$ МА передавать пакет в КС не будут. По подобию рассмотренного события выше, вероятность данного события будет равна:

$$Q_r(i,n)=C_i^n(1-q_r)^{n-i}q_r^i. \quad (15)$$

Логику переходов нагляднее всего описывать в терминах событий. События, используемые для описании логики переходов, а также их вероятностные меры приведены в *таблице 1*.

Процесс передачи запроса по предлагаемой стратегии по запросному каналу в режиме двойного использования представляет собой эргодическую, дискретную по времени и по множеству состояний, конечную цепь Маркова [5,6], граф переходов которой представлен на *рисунке 3*.

В *таблице 2* представлены соответствия условий переходов на графе переходов событиям.

Совокупность представленных условий описывает переход канала из любого, произвольного состояния пространства состояний $S$ в любое, включая исходное. Соотношения, характеризующие вероятностные меры указанных событий будут являться универсальными для всего пространства состояний.

Пользуясь основными теоремами теории вероятностей, а именно теоремой сложения и умножения вероятностей получим следующее аналитическое выражение, характеризующее вероятностную меру полной группы событий и используемое для составления матрицы переходных вероятностей (МПВ):

**Таблица 1**

Перечень событий процесса функционирования запросного канала

| Символ события | Описание | Вероятность |
|---|---|---|
| $C_з$ | Наступление слота для передачи запроса (любого типа) | $K_{ц.и.}$ |
| $C_{з1}$ | Наступление слота для передачи запроса, относящегося к первому типу | $P_{ш1}$ |
| $C_{з2}$ | Наступление слота для передачи запроса, относящегося к первому типу | $P_{ш2}$ |
| $C_д$ | Наступление слота для передачи донесения | $(1-K_{ц.и.})$ |
| $A_1(0)$ | Никто из МА(з), находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага первого типа не сгенерировал запрос | $Q_{a1}(0,n)$ |
| $A_2(0)$ | Никто из МА(з), находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага второго типа не сгенерировал запрос | $Q_{a2}(0,n)$ |
| $A_1(\bar{0})$ | Один или более МА(з), находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага первого типа сгенерировали запрос и передал его в запросный канал | $(1-Q_{a1}(0,n))$ |
| $A_2(\bar{0})$ | Один или более МА(з), находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага второго типа сгенерировали запрос и передал его в запросный канал | $(1-Q_{a2}(0,n))$ |
| $A_1(i)$ | $i$ МА(з), находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага первого типа сгенерировали запрос и передал его в запросный канал | $Q_{a1}(i,n)$ |
| $A_2(i)$ | $i$ МА(з), находящихся в режиме первичной генерации на длительности шага второго типа сгенерировали запрос и передал его в запросный канал | $Q_{a2}(i,n)$ |
| $R(0)$ | Никто из МА(з), находящихся в режиме повторной передачи не передал (выдал) запрос в запросный канал | $Q_r(0,n)$ |
| $R(\bar{0})$ | Один или более МА(з), находящихся в режиме повторной передачи передали запрос в запросный канал | $(1-Q_r(0,n))$ |
| $R(i)$ | $i$ МА(з), находящихся в режиме повторной передачи передали запрос в запросный канал | $Q_r(i,n)$ |

$$p_{n,n+i}^{KC,c1}=\begin{cases}K_{ц.и.}\left(P_{ш1}Q_{a1}(i,N-n)+P_{ш2}Q_{a2}(i,N-n)\right), & \text{"1"}\\ K_{ц.и.}\left(P_{ш1}Q_{a1}(1,N-n)+P_{ш2}Q_{a2}(1,N-n)\right)\left(1-Q_r(0,n)\right), & \text{"2"}\\ K_{ц.и.}\left(\begin{array}{l}P_{ш1}\left(\begin{array}{l}Q_{a1}(1,N-n)Q_r(0,n)+\\+Q_{a1}(0,N-n)(1-Q_r(1,n))\end{array}\right)+\\ P_{ш2}\left(\begin{array}{l}Q_{a2}(1,N-n)Q_r(0,n)+\\+Q_{a2}(0,N-n)(1-Q_r(1,n))\end{array}\right)\end{array}\right)+(1-K_{ц.и.}), & \text{"3"}\\ K_{ц.и.}\left(P_{ш1}Q_{a1}(0,N-n)+P_{ш2}Q_{a2}(0,N-n)\right)Q_r(1,n), & \text{"4".}\end{cases} \quad (16)$$

Исходным состоянием процесса функционирования запросного канала является состояние $S_0$, в котором все МА находятся в режиме первичной генерации запросов, однако при анализе процесса функционирования запросного канала нас интересует не переходный, а установившийся (стационарный) режим эргодической цепи, финальные вероятности которого находятся как результат решения системы линейных уравнений вида:

$$\left.\begin{array}{l}p_m^{KC(\phi)}=\sum\limits_{n\in S}p_n^{KC(\phi)}p_{n,m}^{KC},\quad m\in S\\ \sum\limits_{n\in S}p_n^{KC(\phi)}=1\end{array}\right\}. \quad (17)$$

Для оценки достижимых характеристик передачи запросов по предлагаемой стратегии необходимо провести оптимизацию параметра алгоритма случайного множественного доступа $q_r$. Для параметра алгоритма СМД оптимальным является значение, обеспечивающее минимальную среднюю задержку передачи запроса:

**Таблица 2**

События и условия переходов

| № перехода | Условие перехода | События |
|---|---|---|
| 1 | $i\geq 2, i\leq (N-n)$ | $C_з\wedge\left(C_{з1}\wedge A_1(i)\vee C_{з2}\wedge A_2(i)\right)$ |
| 2 | $i=1$ | $C_з\wedge\left(C_{з1}\wedge A_1(1)\vee C_{з2}\wedge A_2(1)\right)\wedge R(\bar{0})$ |
| 3 | $i=0$ | $C_з\wedge\left(\begin{array}{l}C_{з1}\wedge\left(A_1(1)\wedge R(0)\vee A_1(0)\wedge R(\bar{1})\right)\vee\\ C_{з2}\wedge\left(A_2(1)\wedge R(0)\vee A_2(0)\wedge R(\bar{1})\right)\end{array}\right)\vee C_д$ |
| 4 | $i=-1$ | $C_з\wedge\left(C_{з1}\wedge A_1(0)\vee C_{з2}\wedge A_2(0)\right)\wedge R(1)$ |

$$q_r^*=\arg\min_{\{q_r\in[0,1]\}}\bar{T}_з(q_r). \quad (18)$$

Методика численного решение задачи оптимизации на основе метода сужения интервала неопределенности приведена в [1]. Результат численного решения задачи оптимизации для представленной стратегии (с1) и стратегии (с2), рассмотренной ранее, представлен на графике *рисунка 4*.

На *рисунке 4* видно отличие оптимального значения параметра алгоритма СМД для каждой из стратегий при заданном коэффициенте целевого использования запросного канала. Оптимальное значение параметра для S-Aloha не зависит от $K_{ц.и.}$, так как существующие математические модели функционирования запросного канала,

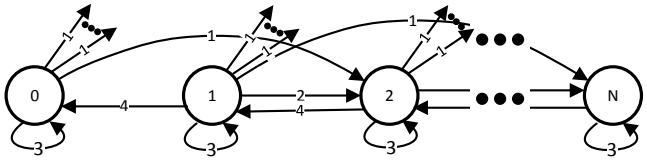



**Рис. 3.** Граф состояний и переходов процесса передачи запроса в режиме двойного использования запросного канала

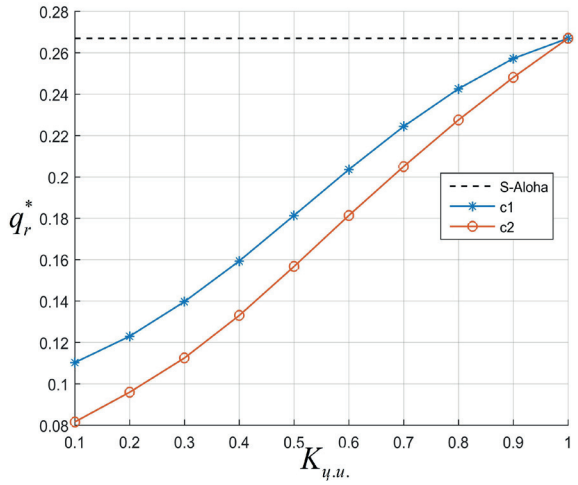



**Рис. 4.** Зависимость оптимального значения параметра алгоритма СМД от коэффициента целевого использования канала сигнализации для различных стратегий СМД («S-Aloha» – алгоритм СМД без учета двойного использования КС, «с1» – стратегий №1 , «с2» – стратегия №2)

**Таблица 3**

Средняя задержка передачи запроса для *Кц.и.=0,9*

| $q_a$ | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\overline{T}_{c1}$ | 0,78 | 1,93 | 3,91 | 6,65 | 9,64 | 12,32 | 14,48 | 16,20 | 17,57 | 18,68 |
| $\overline{T}_{c2}$ | 0,66 | 1,80 | 3,81 | 6,64 | 9,71 | 12,43 | 14,63 | 16,36 | 17,73 | 18,84 |
| №с | **2** | **2** | **2** | **2** | **1** | **1** | **1** | **1** | **1** | **1** |

**Таблица 4**

Средняя задержка передачи запроса для *Кц.и.*=0,4

| $q_a$ | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,09 | 0,1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\overline{T}_{c1}$ | 9,28 | 21,59 | 32,69 | 39,96 | 44,67 | 47,92 | 50,26 | 52,03 | 53,42 | 54,53 |
| $\overline{T}_{c2}$ | 7,63 | 21,44 | 33,93 | 41,67 | 46,52 | 49,79 | 52,12 | 53,85 | 55,18 | 56,23 |
| №с | **2** | **2** | **1** | **1** | **1** | **1** | **1** | **1** | **1** | **1** |

используемые для расчета средней задержки не учитывают двойное использование. Различие оптимальных значений между стратегиями обусловлено различием алгоритмов доступа к запросному каналу. При $K_{ц.и.}=1$ оптимальные значения параметра каждой из стратегий совпадают с оптимальным значением алгоритма S-Aloha, что подтверждает адекватность составленных математических моделей.

Сравнение представленных стратегий по оперативности передачи запроса (характеризуемой средней задержкой передачи запроса) при оптимальных значениях параметра алгоритмов СМД представлено в *таблицах 3-4*.

В представленных таблицах последняя строка «№с» указывает номер стратегии, обладающей меньшей средней задержкой передачи запроса. Из представленных таблиц видно, что преимущество одной стратегии по отношению к другой определяется уровнем интенсивности генерации запросов и значением коэффициента целевого использования канала сигнализации. Таким образом, выбор стратегии передачи запроса для заданного числа МА и заданного уровня интенсивности генерации запросов определяется заданным уровнем целевого использования запросного канала, а итоговая методика определения значений параметров схемы двойного использования запросного канала должна включать в себя математические модели функционирования запросного канала для двух рассмотренных стратегий.

**Литература**

1. Донцов Д.В., Косяк А.И., Шиманов С.Н. Передача запросов в режиме двойного использования запросного канала по алгоритму тактированного случайного множественного доступа// Известия Института инженерной физики, 2020. №2(56). С.61-64.
2. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. 544 с.
3. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. М.: Мир, 1979. 600 с.
4. Войтер А.П. Протоколы случайного множественного доступа для вычислительных сетей с пакетной радиосвязью// Управляющие системы и машины, 1984. №4. С.45-50.
5. Кемени Дж.Дж., Снелл Дж.Л. Конечные цепи Маркова. М.: Наука, 1970. 272 с.
6. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: монография. М.: Вузовская книга, 2014. 144 с.
7. Вержбицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения): Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2000. 266 с.

УДК 621.394

# МЕТОД ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ С КОДОВЫМ УПЛОТНЕНИЕМ ДАННЫХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ

# METHOD FOR ASSESSING THE NOISE IMMUNITY OF DIGITAL SYSTEMS WITH CODE DATA COMPRESSION UNDER THE INFLUENCE OF STATIONARY INTERFERENCE

Владимир Владимирович Зеленевский
*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

Анатолий Владимирович Зеленевский
*кандидат технических наук*
заместитель начальника отдела
АО «Фирма НТЦ «КАМИ»
Адрес: 119361, Москва, ул. Большая Очаковская, д. 47а, стр. 1
Тел.: 8 (926) 150-83-76

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

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

**Аннотация**

В статье предложена структурная схема цифровой системы передачи с кодовым уплотнением данных, реализующая когерентный прием ФМ-сигнала в целом. Разработан метод оценки помехоустойчивости предложенной системы передачи данных, получены численные оценки помехоустойчивости при воздействии заградительных, псевдошумовых и гармонических помех. Доказана сходимость полученных оценок помехоустойчивости с известными для частных условий.

**Ключевые слова:** кодовое уплотнение данных, ортогональные функции Уолша, псевдослучайные последовательности, свертка сигналов, коэффициент взаимной корреляции, стационарные помехи, вероятность битовой ошибки.

**Summary**

The article proposes a block diagram of a digital transmission system with code data compression, which implements the coherent reception of the FM signal as a whole. A method for assessing the noise immunity of the proposed data transmission system is developed, and numerical estimates of the noise immunity under the influence of barrage, all-noise, and harmonic noise are obtained. The convergence of the obtained noise immunity estimates with the known for particular conditions is proved.

**Keywords:** code data compression, Walsh orthogonal functions, pseudorandom sequences, signal convolution, cross-correlation coefficient, stationary interference, probability of bit error.

Известно [1], что остаточная составляющая несущей частоты передаваемого модулированного сигнала является в определенном смысле бесполезно растрачиваемой энергией, так как энергия на несущей частоте используется не для передачи полезной информации (данных, телефонных сигналов), а только для передачи самой несущей. Поэтому большинство современных систем передачи данных с фазовой модуляцией сигнала являются системой с подавленной несущей. В этом случае на несущей частоте нет передаваемой полезной энергии, а вся передаваемая энергия уходит на модуляцию (на боковые составляющие частотного спектра передаваемого сигнала).

Это означает, что не существует сигнала, со-

ставляющего основу для работы системы частотной синхронизации сигнала на приемной стороне с точностью до фазы (фазовой автоподстройки частоты – ФАПЧ).

Решение задачи частотной синхронизации сигнала с точностью до фазы в такой постановке осуществлено в известных работах [2,4] применительно к приемникам с фазовой манипуляцией и расширенным спектром по закону псевдослучайной последовательности.

Поэтому предлагается структурная схема передающего тракта с кодовым уплотнением данных, использующая не только ортогональные последовательности Уолша ($Wal_i(t)$), но и двоичную фазовую манипуляцию группового радиосигнала с первичной угловой модуляцией (*рисунок 1*).

На *рисунке 1* обозначены:

- АЦП – аналого-цифровой преобразователь, являющийся источником передаваемых данных;
- сумматоры по модулю два (=1), осуществляющие информационную модуляцию ортогональных последовательностей Уолша-Адамара ($Wal_i(t)$), которые формируются известным генератором Уолша [4,5];
- ФПК – формирователи полярного кода, преобразующие унитарный входной двоичный код {0,1} в полярный выходной код {–1,1};
- $\sum$ – сумматор, выполняющий алгебраическое сложение принятых двоичных полярных символов и формирующий $(n+1)$-уровневый групповой сигнал ($n$ – число разрядов кода на выходе АЦП);
- ФНЧ – фильтр нижних частот, осуществляющий «сглаживание» импульсов группового сигала и сужение его частотного спектра;
- ЧМ – частотный модулятор, осуществляющий изменение частоты сигнала задающего генератора $G_0$ по закону изменения амплитуды группового сигнала (ФНЧ, ЧМ и $G_0$ образуют первичный угловой модулятор $ФМ_1$);
- МФ – манипулятор фазы, который изменяет фазу входного сигнала на 180° по закону псевдослучайной n-разрядной последовательности, которая формируется генератором псевдослучайной последовательности (ГПСП);
- ГТИ – генератор тактовых импульсов, обеспечивающий тактовую (временную) синхронизацию АЦП, генераторов последовательностей Уолша и ПСП;
- ОКП – оконечные каскады радиопередатчика, формирующие заданные параметры радиосигнала, излучаемого антенной WA1.

Принцип работы передающего тракта

Пусть на выходе АЦП сформирован 8-ми ($n=8$) разрядный двоичный код {1 1 1 1 1 1 1 0}.

В качестве ортогональных функций Уолша-$Wal_i(t)$ будем использовать сигналы:

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Wal_1(t)\rightarrow$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | $\leftrightarrow$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | $\rightarrow Wal_1^{(п)}(t)$; |
| $Wal_2(t)\rightarrow$ | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | $\leftrightarrow$ | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | $\rightarrow Wal_2^{(п)}(t)$; |
| $Wal_3(t)\rightarrow$ | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | $\leftrightarrow$ | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | $\rightarrow Wal_3^{(п)}(t)$; |
| $Wal_4(t)\rightarrow$ | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | $\leftrightarrow$ | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | $\rightarrow Wal_4^{(п)}(t)$; |
| $Wal_5(t)\rightarrow$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\leftrightarrow$ | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | $\rightarrow Wal_5^{(п)}(t)$; |
| $Wal_6(t)\rightarrow$ | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | $\leftrightarrow$ | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | $\rightarrow Wal_6^{(п)}(t)$; |
| $Wal_7(t)\rightarrow$ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | $\leftrightarrow$ | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | $\rightarrow Wal_7^{(п)}(t)$; |
| $Wal_8(t)\rightarrow$ | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | $\leftrightarrow$ | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | $\rightarrow Wal_8^{(п)}(t)$; |

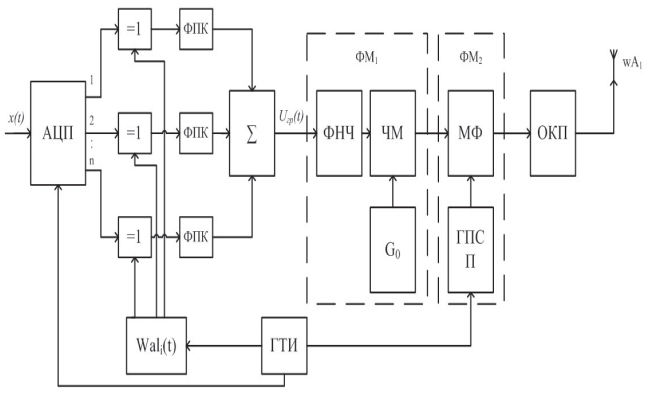



**Рис. 1.** Структурная схема передающего тракта

Тогда на выходе сумматора получим групповой многоуровневый сигнал вида {-7;-2;-2;2;-2;2;2;-2}.

На выходе ФМ1 получим аналоговый сигнал с постоянной амплитудой и изменяющейся частотой (фазой), а на выходе ФМ2 получим дискретный сигнал с подавленной несущей, у которого фаза изменяется на 180° по закону ПСП (*рисунок 2*).

Структурная схема приемного тракта представлена на *рисунке 3*, где приняты следующие обозначения:

- $WA_1$ – приемная антенна, преобразующая энергию электромагнитной волны заданной поляризации в токи радиочастоты, которые поступают на вход полосового фильтра (ПФ), осущест-

вляющего предварительную частотную избирательность, а также подавление помеховых сигналов соседних станций и зеркальной помехи;

- $П_1$ – перемножитель, осуществляющий свертку принятого сигнала с двоичной фазовой манипуляцией и псевдослучайной последовательности, копия которой известна на приемной стороне (ГПСП приемной стороны идентичны ГПСП передающей стороны);
- ФАПЧ – система фазовой автоподстройки частоты, обеспечивающая равенство с точностью до фазы центральной частоты частотного модулятора передатчика и местного управляемого генератора приемника;
- $П_2$ – перемножитель, осуществляющий свертку принятого сигнала с двоичной фазовой манипуляцией и гармонического сигнала с выхода местного управляемого генератора ФАПЧ;
- ФДМ – фазовый демодулятор, на выходе которого формируется напряжение многоуровневого группового сигнала с возможными искажениями;
- ДСЗ – дискриминатор системы задержки по времени принятого сигнала ПСП с выхода $П_2$ относительно сформированного сигнала ПСП на приемной стороне, формирующий сигнал рассогласования для управления генератором тактовых импульсов (УГТИ приемника);
- КД – корреляционные декодеры реализуют прием группового сигнала в целом и определяют значения коэффициента взаимной корреляции $\rho_{ij}$ между принятым групповым сигналом и соответствующей последовательностью Уолша $Wal_i(t)$ в полярном коде, если $\rho_{ij}<0$ – выносится решение о принятом единичном символе, если $\rho_{ij}>0$ – принимается решение о переданном нулевом символе, если $\rho_{ij}=0$ – осуществляется стирание символа;
- ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь восстанавливает переданный сигнал $x(t)$ к виду удобному для получателя сообщения.

Таким образом, благодаря наличию схемы ФАПЧ осуществляется синхронизация частоты передатчика и приемника, благодаря наличию перемножителей $П_1$ и $П_2$, ГПСП, ДСЗ и УГТИ осуществляется тактовая синхронизация передающего и приемного трактов.

После установления кодовой синхронизации (ФАПЧ, ГПСП) сигнал на входе фазового демодулятора имеет вид:

$$y_{вх.}(t)=\sqrt{2P_s}\,d(t)P(t)\cos(\omega_0 t+Q_0)+n(t)P(t)+J(t)P(t), \quad (1)$$

где сомножитель $P(t)$ обеспечивает распределение энергии помехи в пределах полосы спектра сигнала.

В предположении идеальной кодовой синхронизации сигнал на выходе корреляционного декодера будет определяться тремя составляющими:

1) полезной энергией

$$\pm 2P(t)nT_b = \pm 2P(t)nT,$$

где $T=n\cdot T_u$

2) энергией собственного шума приемника;

3) энергией помехи

$$\int_0^{} 2J(t)P(t)\cos(\omega_0 t+Q_0)\,dt$$

Решение будет принято правильно:

- если сумма всех составляющих $Z(t)<0$, тогда $d(t)=+1$;
- если сумма всех составляющих $Z(t)>0$, тогда $d(t)=-1$.

На приемной стороне на выходе П1 в идеале мы получим сигнал UФМ1, который поступает на первый вход ФДМ, а на выходе $П_2$ – сигнал UПСП, который поступает на схему временной (тактовой) синхронизации (ДСЗ, УГТИ). В свою очередь групповой многоуровневый сигнал с выхода ФДМ поступает на первые входы корреляционных декодеров (КД), где определяются его коэффициенты корреляции $\rho_{ij}$ с известными полярными копиями $Wal_i^{(П)}(t)$. Рассмотрим пример оценки коэффициентов $\rho_{ij}$ для искаженного помехами принятого группового сигнала, при условии, что передавался 8-ми разрядный нулевой код, а переданный групповой сигнал имеет вид

(8;0;0;0;0;0;0;0).

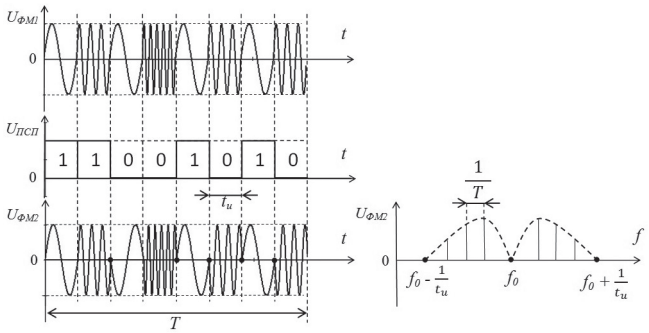



**Рис. 2.** Временные и частотная диаграммы сигналов

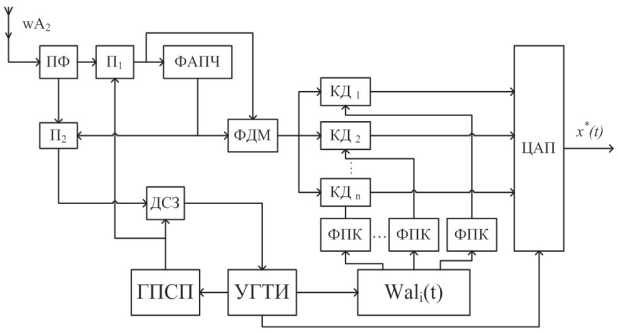



**Рис. 3.** Структурная схема приемного тракта

Пусть искаженный помехами групповой сигнал

$$U^*_{ГР}(t)=\{8;–4;–5;\ 4;\ 2;\ 0;\ 0;\ 0\}$$

поступает на первые входы всех КД$_i$. В этом случае на выходе КД$_1$ получим

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 8 | -4 | -5 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | |
| × | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| | 8 | -4 | -5 | +4 | +2 | +0 | +0 | +0 | $=\rho_1=5$, |

что соответствует правильному решению о принятом «0», так как действительно передавался «0»;

во втором КД$_2$ получим:

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 8 | -4 | -5 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | |
| × | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | |
| | 8 | +4 | -5 | -4 | +2 | +0 | +0 | +0 | $=\rho_2=5$, |

что соответствует правильному решению о принятом «0», так как действительно передан «0»;

для остальных КД получим:

$$\rho_3=5;\ \rho_4=21;\ \rho_5=1;\ \rho_6=1;\ \rho_7=3;\ \rho_8=19,$$

что соответствует правильным решениям о переданных нулевых символах.

Однако ситуация может измениться, если действует стационарная помеха, изменяющая более значительно уровни группового сигнала. В работе [5] представлены аналитические выражения для оценки помехоустойчивости (вероятности битовой ошибки) только для условий воздействия аддитивного белого гауссова шума.

### Оценка помехоустойчивости системы передачи с кодовым уплотнением при воздействии стационарных помех

Исследуем заградительную (широкополосную) помеху, сосредоточенную по полосе (помеху в части полосы частотного спектра полезного радиосигнала), псевдошумовую и гармоническую (узкополосную) помехи. Такие помехи относят к стационарным помехам и, несмотря на различия в их физической сущности, имеется общий методический подход при оценке помехоустойчивости систем радиосвязи с двоичными фазоманипулированными сигналами [2].

Суммарный сигнал на выходе полосового фильтра радиоприемника в условиях воздействия помехи $J(t)$ можно представить в виде:

$$y(t)=\sqrt{2P_s}\,d(t)P(t)\cos(\omega_0 t+\mathrm{Q}_1)+n(t)+J(t), \quad (2)$$

где $P_S$ – мощность сигнала;

$n(t)$ – собственные шумы приемника, которые при фиксированной полосе пропускания приемника хорошо аппроксимируются гауссовым случайным процессом

$$n(t)=n_c(t)\cos\omega_0 t+n_s(t)\sin\omega_0 t;$$

$n_c(t)$, $n_s(t)$ – статистические независимые гауссовские случайные процессы со средним значением, равным нулю и дисперсией

$$D\{n_c(t)\}=D\{n_s(t)\}=\sigma_0^2.$$

Вероятность ошибки декодирования двоичного символа на выходе корреляционного декодера полярного низкочастотного сигнала определяется известным выражением [1]

$$P_{bi}=Q\left(\sqrt{2h_0^2}\right), \quad (3)$$

где

$$Q\left(\sqrt{2h_0^2}\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{\sqrt{2h_0^2}}^{\infty}\exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)dt.$$

Для когерентного приема сигнала в целом получим

$$P_{bi}=Q\left(\sqrt{2nh_0^2}\right). \quad (4)$$

Тогда вероятность ошибочного приема недвоичного символа на выходе ЦАП при наличии аддитивного белого гауссова шума будет равна

$$P_m=1-\left(1-P_{bi}\right)^n. \quad (5)$$

Учитывая, что априорные вероятности появления нулевых и единичных символов $P(0)=P(1)=0{,}5$, выходная вероятность битовой ошибки

$$P_b\cong 0{,}5P_m.$$

Численные значения вероятностей $P_{bi}$, $P_m$, $P_b$ для $n=8$ (байтовая передача данных) и различных значений $h_0^2$ в условиях воздействия АБГШ представлены в *таблице 1*.

**Таблица 1**

Зависимости $P_{bi}$, $P_m$, $P_b=f(h_0^2)$ для $n=8$

| $h_0^2$ | 0.69 | 1 | 1.4 | 2 |
|---|---|---|---|---|
| $P_{bi}$ | $4{,}51\cdot10^{-4}$ | $3{,}17\cdot10^{-5}$ | $1{,}05\cdot10^{-6}$ | $7{,}43\cdot10^{-9}$ |
| $P_m$ | $3{,}6\cdot10^{-3}$ | $2{,}536\cdot10^{-4}$ | $8{,}4\cdot10^{-6}$ | $5{,}944\cdot10^{-8}$ |
| $P_b$ | $1{,}8\cdot10^{-3}$ | $1{,}268\cdot10^{-4}$ | $4{,}2\cdot10^{-6}$ | $2{,}972\cdot10^{-8}$ |

Полученные оценки вероятности $P_b$ хорошо согласуются с результатами имитационного моделирования, опубликованными в работе [5], а также с оценками, полученными в исследованиях члена-корреспондента РАН В.И. Борисова [2], где вероятность $P_{bi}$ может быть рассчитана по выражению с учетом приема сигнала в целом

$$P_{bi}=\frac{1}{2}erfc\left(\frac{nh_b^2}{\sqrt{2}}\right), \quad (6)$$

где

$$erfc\left(\frac{nh_b^2}{\sqrt{2}}\right)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_{\frac{nh_b^2}{\sqrt{2}}}^{\infty}\exp\left(-t^2\right)dt.$$

Таким образом, установлено, что оценку вероятностей $P_{bi}$ в условиях воздействия АБГШ можно осуществить по двум независимым аналитическим выражениям (1) и (2) и эти оценки совпадают с аппроксимационными результатами, опубликованными в работе [5].

Кроме того, в работе [3] получено аналити-

**Таблица 2**

Оценки $P_{bi}$, $P_m$, $P_b = f(h_b^2, \frac{P_j}{P_c}, h_м^2)$ при $n=const$, $\eta=const$

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $n=8$ $\eta=0{,}45$ (заградительная) | $\frac{P_j}{P_c}=1$ | $h_b^2$ | 0,69 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| | | $h_м^2$ | 5,55 | 8 | 16 | 24 | 40 | 80 |
| | | $P_{bi}$ | $1{,}834\cdot10^{-3}$ | $4{,}47\cdot10^{-4}$ | $2\cdot10^{-5}$ | $3{,}07\cdot10^{-6}$ | $3{,}53\cdot10^{-7}$ | $3{,}45\cdot10^{-8}$ |
| | | $P_m$ | 0,015 | $3{,}57\cdot10^{-3}$ | $1{,}6\cdot10^{-4}$ | $2{,}456\cdot10^{-5}$ | $2{,}824\cdot10^{-6}$ | $2{,}76\cdot10^{-7}$ |
| | | $P_b$ | 0,0075 | $1{,}785\cdot10^{-3}$ | $8\cdot10^{-5}$ | $1{,}228\cdot10^{-5}$ | $1{,}412\cdot10^{-6}$ | $1{,}38\cdot10^{-7}$ |
| $n=8$ $\eta=0{,}66$ (псевдошумовая) | $\frac{P_j}{P_c}=1$ | $h_b^2$ | 0,69 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| | | $h_м^2$ | 5,55 | 8 | 16 | 24 | 40 | 80 |
| | | $P_{bi}$ | $2{,}96\cdot10^{-3}$ | $9{,}53\cdot10^{-4}$ | $10^{-4}$ | $2{,}98\cdot10^{-5}$ | $8{,}084\cdot10^{-6}$ | $2{,}235\cdot10^{-6}$ |
| | | $P_m$ | 0,023 | $7{,}6\cdot10^{-3}$ | $8\cdot10^{-4}$ | $2{,}384\cdot10^{-4}$ | $6{,}467\cdot10^{-5}$ | $1{,}788\cdot10^{-5}$ |
| | | $P_b$ | 0,0115 | $3{,}8\cdot10^{-3}$ | $4\cdot10^{-4}$ | $1{,}192\cdot10^{-4}$ | $3{,}23\cdot10^{-5}$ | $8{,}9\cdot10^{-6}$ |
| $n=8$ $\eta=1$ (гармоническая) | $\frac{P_j}{P_c}=1$ | $h_b^2$ | 0,69 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| | | $h_м^2$ | 5,55 | 8 | 16 | 24 | 40 | 80 |
| | | $P_{bi}$ | $5{,}32\cdot10^{-3}$ | $2{,}34\cdot10^{-3}$ | $5{,}43\cdot10^{-4}$ | $2{,}65\cdot10^{-4}$ | $1{,}3\cdot10^{-4}$ | $6{,}84\cdot10^{-5}$ |
| | | $P_m$ | 0,042 | 0,019 | $4{,}336\cdot10^{-3}$ | $2{,}118\cdot10^{-3}$ | $1{,}04\cdot10^{-3}$ | $5{,}471\cdot10^{-4}$ |
| | | $P_b$ | 0,021 | 0,01 | $2{,}168\cdot10^{-3}$ | $1{,}059\cdot10^{-3}$ | $5{,}02\cdot10^{-4}$ | $2{,}74\cdot10^{-4}$ |
| $n=16$ $\eta=1$ (гармоническая) | $\frac{P_j}{P_c}=2$ | $h_b^2$ | 0,69 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| | | $h_м^2$ | 11,1 | 16 | 32 | 48 | 80 | 160 |
| | | $P_{bi}$ | $1{,}116\cdot10^{-3}$ | $5{,}46\cdot10^{-4}$ | $1{,}73\cdot10^{-4}$ | $1{,}067\cdot10^{-4}$ | $6{,}85\cdot10^{-5}$ | $4{,}74\cdot10^{-5}$ |
| | | $P_m$ | 0,018 | 0,0087 | 0,002764 | 0,001706 | $1{,}095\cdot10^{-3}$ | $7{,}581\cdot10^{-4}$ |
| | | $P_b$ | 0,009 | 0,00435 | 0,001382 | $5{,}35\cdot10^{-4}$ | $5{,}475\cdot10^{-4}$ | $3{,}79\cdot10^{-4}$ |
| $n=32$ $\eta=1$ (гармоническая) | $\frac{P_j}{P_c}=3$ | $h_b^2$ | 0,69 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| | | $h_м^2$ | 22,2 | 32 | 64 | 96 | 160 | 320 |
| | | $P_{bi}$ | $7{,}4\cdot10^{-5}$ | $3{,}17\cdot10^{-5}$ | $9{,}48\cdot10^{-6}$ | $5{,}87\cdot10^{-6}$ | $3{,}89\cdot10^{-6}$ | $2{,}77\cdot10^{-6}$ |
| | | $P_m$ | $2{,}365\cdot10^{-3}$ | $1{,}014\cdot10^{-3}$ | $3{,}033\cdot10^{-4}$ | $1{,}878\cdot10^{-4}$ | $1{,}245\cdot10^{-4}$ | $8{,}864\cdot10^{-5}$ |
| | | $P_b$ | $1{,}68\cdot10^{-3}$ | $5{,}07\cdot10^{-4}$ | $1{,}501\cdot10^{-4}$ | $9{,}439\cdot10^{-5}$ | $6{,}122\cdot10^{-5}$ | $4{,}43\cdot10^{-5}$ |
| $n=8$ $\eta=0$ (АБГШ) | $\frac{P_j}{P_c}=0$ | $h_b^2$ | 0,69 | 1 | 1,4 | 2 | | |
| | | $h_м^2$ | 5,55 | 8 | 11,2 | 16 | | |
| | | $P_{bi}$ | $4{,}51\cdot10^{-4}$ | $3{,}17\cdot10^{-5}$ | $1{,}05\cdot10^{-6}$ | $7{,}43\cdot10^{-9}$ | | |
| | | $P_m$ | $3{,}6\cdot10^{-3}$ | $2{,}536\cdot10^{-4}$ | $8{,}4\cdot10^{-6}$ | $5{,}944\cdot10^{-8}$ | | |
| | | $P_b$ | $1{,}8\cdot10^{-3}$ | $1{,}268\cdot10^{-4}$ | $4{,}2\cdot10^{-6}$ | $2{,}975\cdot10^{-8}$ | | |

ческое выражение для расчета вероятностей $P_{bi}$ в условиях воздействия не только АБГШ, но и стационарных помех.

Применительно к предложенной схеме радиоприемника (*рисунок 2*) вероятность $P_{bi}$ в условиях воздействия стационарных помех будем оценивать по выражению [3]

$$P_{bi} = \frac{1}{2} erfc\left[\left(\frac{1}{nh_b^2} + \frac{\eta}{n}\frac{P_j}{P_c}\right)^{-0,5}\right], \qquad (7)$$

где – параметр помехи, зависящий от расстройки по частоте между сигналом и помехой и отношения ширины спектра помехи ($\Delta F_П$) к ширине частотного спектра сигнала ($\Delta F_C$) (*рисунок 4*);

$\frac{P_j}{P_c}$ – отношение мощности помехи $P_j$ к мощности сигнала $P_c$.

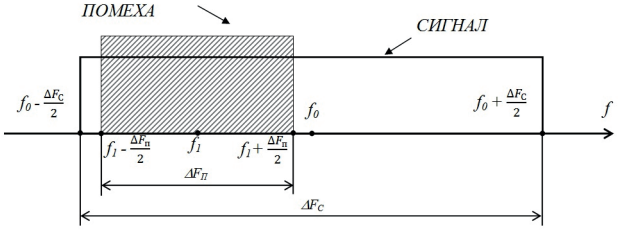



**Рис. 4.** Накладка частотного спектра помехи на спектр полезного сигнала

Установлено [2], для узкополосной гармонической помехи на несущей частоте $f_1=f_0$ значение $\eta_{max}=1$, для заградительной помехи максимальное значение параметра $\eta$ достигается в отсутствие расстройки $f_1-f_0=0$ и в этом случае $\eta_{max}=0{,}45$. Максимальная эффективность псевдошумовой помехи обеспечивается также в отсутствие частотной расстройки $f_1-f_0=0$, зависит от отношения длительности элементов ПСП ($t_u$) и псевдошумовой последовательности ($t_g$) и

$$\eta_{\max}^{ПШПП} = 0{,}66 \text{ [2].}$$

Для шумовой помехи в части полосы значение $\eta_{\max}^{ШП}$ примерно на 10% больше значения $\eta_{\max}^{ПШПП}$.

В *таблице 2* представлены оценки вероятностей

$$P_{bi}, P_m, P_b$$

и соответствующие им значения

$$h_b^2, n, \eta, \frac{P_j}{P_c}$$

и $h_м^2 = n \cdot p_b^2$ - отношение сигнал/шум на символ.

Анализ результатов, представленных в *таблице 2* показывает:

- наиболее опасной является гармоническая помеха, при $n = const, \frac{P_j}{P_c} = const$ для гармонической помехи вероятность $P_b$ наибольшая (помехоустойчивость наименьшая);
- при $n = const, \frac{P_j}{P_c} = const$ увеличение $h_b^2$ не позволяет значительно уменьшить вероятность $P_b$, что свидетельствует об опасности мощных стационарных помех, источник которых находится вблизи радиоприемного устройства;
- при увеличении длины кодовой последовательности ($n$=16, $n$=32) возможно обеспечить требуемую вероятность $P_b \le 10^{-3}$ даже в условиях превышения $P_j > P_c$, что очень важно для практики (ведь спектр радиосигнала не расширяется и скорость передачи данных в канале не изменяется, а другими известными способами получить такие результаты невозможно).

Таким образом, увеличение длины последовательностей Уолша позволит повысить помехоустойчивость системы передачи данных с кодовым уплотнением не только в условиях воздействия АБГШ, но и при воздействии наиболее опасной гармонической помехи. При этом, что очень важно, достигается теоретический предел К. Шеннона по помехоустойчивости (при $h_b^2$=0,69, $n$=32 значение $P_b$=1,68.10$^{-3}$, а при $\eta=0, \frac{P_j}{P_c} = 0$ численные оценки $P_b$ сходятся с известными, полученными при воздействии АБГШ.

**Литература**

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. Пер. с англ. М.: Издат. дом «Вильямс», 2007. 1104 с.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Шестопалов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра прямой модуляцией псевдослучайной последовательностью. Под ред. В.И. Борисова. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Радиософт, 2011. 550 с.
3. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Наконечный Б.М., Шмырин Е.В. Статистический анализ воздействия узкополосных помех на мягкое декодирование двоичных ФМ-сигналов// Известия Института инженерной физики, 2013. №1(27). С.47-49.
4. Адресные системы управления и связи. Вопросы оптимизации/ Г.И. Тузов, Ю.Ф. Уредников, В.И. Прытков и др. Под редакцией Г.И. Тузова. М.: Радио и связь, 1993. 384 с.
5. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Дурнов А.С. Статистические характеристики систем передачи с кодовым ортогональным уплотнением данных при воздействии гауссова шума// Электросвязь, 2018. №7. С.42-45.

УДК 004.89

# МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ МАНЕВРИРУЮЩИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

# METHOD OF IDENTIFYING MANEUVERING SPACECRAFT BASED ON NEURAL NETWORK CLASSIFICATION OF RADAR IMAGES

Ярослав Николаевич Гусеница
*кандидат технических наук*
начальник научно-исследовательского отдела
ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА»
Адрес: 353456, Краснодарский край, г. Анапа, Пионерский пр., д. 41
Тел.: +7 (981) 831-50-29
E-mail: yaromir226@gmail.com

Олег Александрович Мишуков
инженер учебной лаборатории
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (921) 764-30-29
E-mail: oleg_mish@mail.ru

Вадим Витальевич Оркин
*кандидат технических наук*
преподаватель
ВКА имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7 (964) 366-69-33
E-mail: orc225@mail.ru

Алексей Александрович Коробков
*кандидат технических наук, доцент*
начальник научно-методического управления
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: korobkow@iifmail.ru

**Аннотация**

Представлен разработанный научно-методический аппарат (НМА) идентификации маневрирующих космических аппаратов (КА) в системе контроля космического пространства (СККП), включающий математическую модель и методику идентификации маневрирующих КА сложной геометрической формы с использованием разноракурсных радиолокационных изображений (РЛИ) от радиолокационной станции (РЛС) радиовидения космических объектов (КО).

Проведено имитационное моделирование процесса идентификации для двенадцати типов КА по координатной (КИ), некоординатной информации (НКИ) и разноракурсным РЛИ с использованием композиции байесовского и нейросетевого классификаторов. Вычислены значения полной матрицы вероятностей правильного распознавания и ошибок распознавания для всех рассмотренных типов КА, полученные результаты подтверждают эффективность разработанного НМА.

Результаты данной работы могут быть полезны при разработке и реализации программно-алгоритмического обеспечения, предназначенного для идентификации маневрирующих КА с использованием КИ, НКИ и РЛИ, в Центре контроля космического пространства.

Дальнейшие направления исследований, в целях выявления возможного дополнительного повышения результативности идентификации маневрирующих КА, состоят в:

- исследованиях по повышению информативности РЛИ путем комплексирования РЛИ разных диапазонов длин волн с целью выявления дополнительных дешифровочных признаков распознавания типов КА;
- исследованиях по определению влияния степени зашумленности РЛИ (отношение сигнал-шум) на вероятность распознавания типов КА.

**Ключевые слова:** маневрирующий космический аппарат, идентификация, распознавание, радиолокационное изображение, локальный центр рассеяния, дескриптивный признак.

**Summary**

The developed scientific and methodological apparatus for identifying maneuvering spacecraft in the space control system, including a mathematical model and methodology for identifying maneuvering spacecraft of complex geometric shape using multi-angle radar images from a radar station for radio imaging of space objects is presented.

Simulation modeling of the identification process for twelve types of spacecraft based on coordinate, non-coordinate information and multi-angle radar images using a composition of Bayesian and neural network classifiers has been carried out. The values of the full matrix of probabilities of correct recognition and recognition errors for all considered types of spacecraft were calculated. Results confirm the effectiveness of the developed scientific and methodological apparatus.

Results of this work can be useful in the development and implementation of software and algorithmic support designed to identify maneuvering spacecraft using coordinate, non-coordinate information and radar images at the Space Control Center.

Further areas for research, in order to identify a possible additional increase in the effectiveness of identification of maneuvering spacecraft, consist in:

- studies to increase the radar information content of images of spacecraft by combining radar images of different wavelength ranges in order to identify additional decoding signs of recognition of types of spacecraft;
- studies to determine the influence of the degree of noise in radar images (signal-to-noise ratio) on the likelihood of recognizing types of spacecraft.

**Keywords:** maneuvering spacecraft, identification, recognition, radar image, local center of scattering, descriptive feature.

**Введение**

Современный этап геополитического развития России характеризуется увеличением уровня существующих и перспективных внешних угроз национальной безопасности, обусловленных стремительным развитием иностранной космической деятельности. Данная тенденция определяет в целях их парирования в космосе и из космоса необходимость информационного обеспечения отечественной системой контроля космического пространства (СККП) военно-политического руководства страны, штабов Вооруженных сил (ВС) Российской Федерации (РФ) и организаций оборонно-промышленного комплекса (ОПК), которые совместно принимают решение на противодействие. В этой связи к СККП предъявляются высокие требования по обеспечению глобального и непрерывного контроля космического пространства на всех освоенных наклонениях и высотах орбит в различных условиях космической обстановки, другими словами, к обеспечению с высокой оперативностью (в режиме реального времени) получения и выдачи потребителю требуемой информации о всех космических объектах (КО), находящихся в околоземном космическом пространстве [3].

Одной из важнейших задач СККП является распознавание КО, в том числе селекция, идентификация и определение их целевого назначения и государственной принадлежности. При этом оперативность решения данной задачи зависит от времени обнаружения и сопровождения КО в заданной зоне действия информационных средств СККП, сбора координатной (КИ) и некоординатной информации (НКИ) о сопровождаемых КО, формирования и выдачи требуемой информации в Центр контроля космического пространства, анализа и принятия решения оператором-аналитиком. Вместе с тем, увеличение интенсивности маневров космических аппаратов (КА) приводит к увеличению времени, необходимого на их идентификацию, и как следствие, к снижению оперативности распознавания КО.

Поэтому работы, посвященные разработке методов идентификации маневрирующих КА, являются весьма актуальными.

В настоящее время в существующие методы идентификации КА основаны либо на аппарате статистической теории распознавания образов [2,4], либо на детерминированном подходе, предполагающем вычисление функций расстояния меду образом и классами [5], либо на применении аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) [6].

В работах [2, 4] идентификация КА основано на аппарате статистической теории распознавания образов и состоит из двух этапов: обучения и экзамена. На этапе обучения происходит формирование эталонных описаний классов КА, представляющих набор отличительных признаков каждого класса КА. Набор признаков формируется по результатам анализа радиолокационных сигнатур и радиолокационной информации (РЛИ) КА разных классов, полученных по результатам натурных измерений. На втором этапе (экзамена) на основе выбранного решающего правила происходит принятие решения о соответствии наблюдаемого КА какому-либо эталонному классу или признание данного КА принадлежащим новому классу. Недостатком данного подхода является необходимость определения информативных (отличительных) признаков каждого класса КА экспертным методом, что делает зависимым качество распознавания от квалификации экспертов.

В работе [5] распознавание типов КА осуществляется по критерию минимума расстояния, где в качестве вектора отличительных признаков каждого класса КА используются эталонные РЛИ КА данного класса, полученные по результатам натурных измерений или моделирования при различных ракурсах наблюдения. Решение о принадлежности наблюдаемого КА к какому-либо эталонному классу происходит путем сопоставления, полученного РЛИ со всеми эталонными РЛИ с вычислением какого-либо вида

меры близости изображения. Недостатком является необходимость сравнения, зарегистрированного РЛИ КА со всеми эталонными РЛИ, что при большом количестве эталонных КА и эталонных РЛИ требует значительных временных и вычислительных затрат. Другим недостатком является низкое качество распознавания по зашумленным РЛИ.

В работе [6] распознавание КА производится по редуцированным РЛИ с использованием аппарата ИНС. Полученное РЛИ КА редуцируется путем выделения контура КА на изображении и инициализации контура измеренным значением эффективной площади рассеяния КА. Редуцированное РЛИ построчно разворачивается в одномерный сигнал и вместе с значением нормированной эффективной площади рассеяния КА подается на вход предварительно обученной ИНС (трехслойный персептрон), после прохождения которой в выходном слое возбуждается нейрон, соответствующий номеру класса КА, к которому отнесен наблюдаемый КА. Достоинством является снижение количества вычислений и уменьшение времени работы на этапе принятия решения о классе распознаваемого объекта. Недостатками являются отсут-

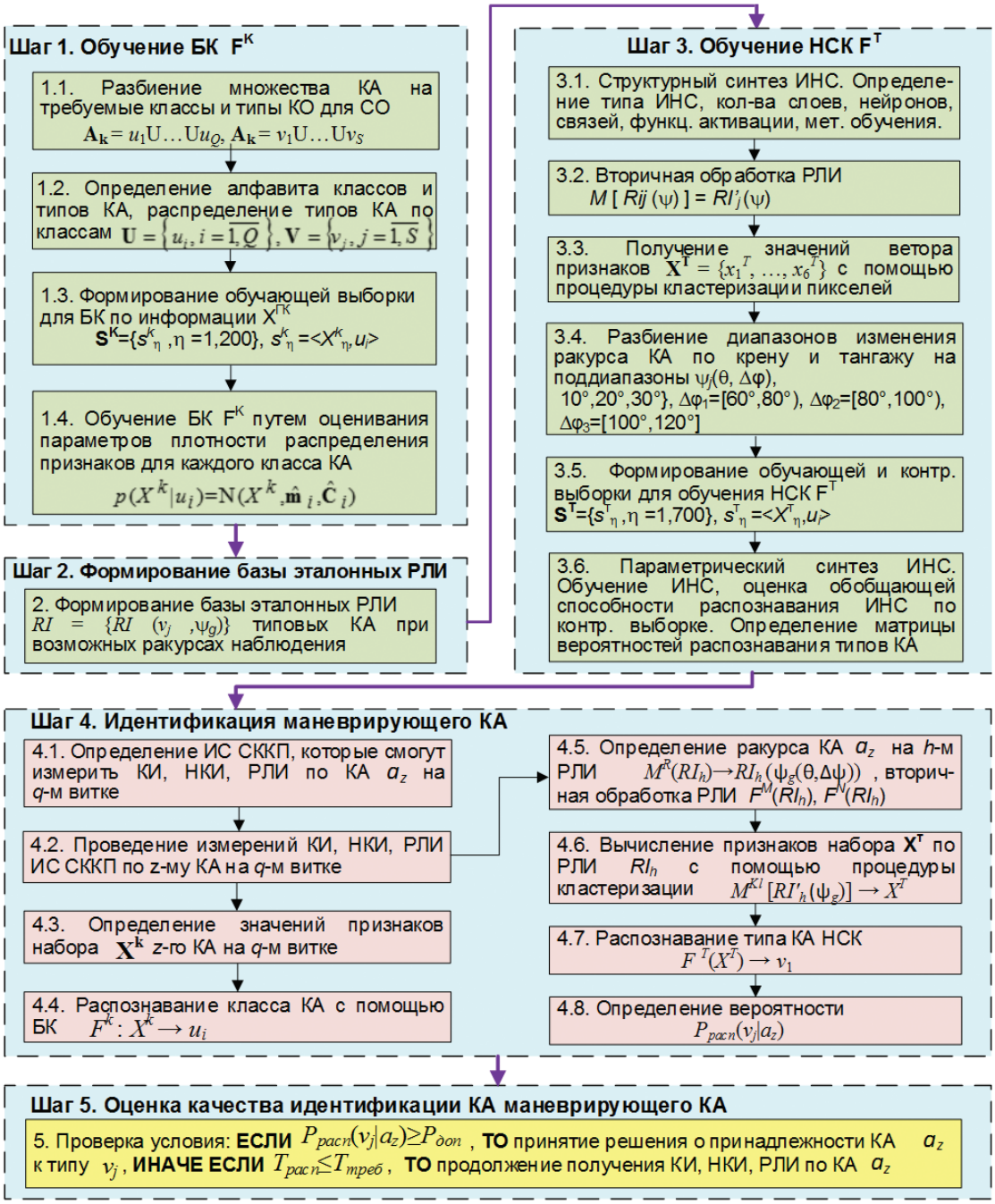



**Рис. 1.** Структурная схема методики

ствие учета изменения ракурса КА на РЛИ при измерении углов ориентации КА относительно линии визирования РЛС, потеря информации об отражающих свойствах отдельных элементов поверхности КА в результате реализации процедуры редуцирования РЛИ и инициализации контура измеренным средним значением эффективной площади рассеяния КА.

Вместе с тем, перечисленные методы не учитывают разнородную информацию, включающую КИ, НКИ и разноракурсные РЛИ КА. Данный недостаток компенсируется применением методики, которая представлена в настоящей статье.

### 1. Содержание методики

Структурная схема методики идентификации маневрирующих КА на основе нейросетевой классификации РЛИ представлена на *рисунке 1*.

Исходными данными являются:

- множество заявок на распознавание маневрирующих КА, принадлежащих космической группировке

$$\mathbf{A} = \{a_i, i = \overline{1, N}\};$$

- требуемые классы КА

$$\mathbf{U} = \{u_i, i = \overline{1, Q}\};$$

- априорная информация о раннее произведенных запусках типовых КА, содержащиеся в Главном каталоге КО СККП;
- множество информационных средств (ИС) СККП, обеспечивающих получение КИ, НКИ и РЛИ для формирования рабочего словаря признаков распознавания классов и типов КА

$$\mathbf{D} = \{d_r, r = \overline{1, R}\};$$

- требования по вероятности ($P_{расп} \geq P_{доп}$) и оперативности распознавания типов КА $T_{треб}$.

На ***первом*** шаге методики производится настройка и обучение байесовского классификатора (БК) для распознавания классов КА, которая включает:

- разбиение множества КА $A_k$ на требуемые классы и типы КА,

$$\mathbf{A_k} = u_1 \cup ... \cup u_Q, \ \mathbf{A_k} = v_1 \cup ... \cup v_S;$$

- определение алфавита классов и типов КА,

$$\mathbf{U} = \{u_i, i = \overline{1, Q}\}, \ \mathbf{V} = \{v_j, j = \overline{1, S}\};$$

- формирование обучающей выборки для обучения БК

$$\mathbf{S^k} = \{s_\eta^k, \eta = \overline{1, 200}\}, \ s_\eta^k = \langle X_\eta^k, u_i \rangle;$$

- обучение БК $F^k$ путем оценивания параметров условной плотности вероятности распределения признаков среди объектов каждого класса КА, имеющей многомерное нормальное распределение

$$p(X^k | u_i) = \mathrm{N}(X^k, \hat{\mathbf{m}}_\mathbf{i}, \hat{\mathbf{C}}_\mathbf{i}).$$

На ***втором*** шаге производится формирование базы данных (БД) эталонных РЛИ типовых КА для всех возможных ракурсов наблюдения. Для каждого типа КА $v_j \in V$ путем натурного моделирования синтезируются РЛИ для всех возможных ракурсов наблюдения КА, которые сохраняются в БД эталонных РЛИ типовых КА [6]:

$$RI = \{RI(v_j, \psi_g), j = \overline{1, S}, g = \overline{1, G}\},$$

где $\psi_g = \psi_k(\theta, \Delta\psi)$ – ракурс КА на РЛИ, определяемый двумя сферическими углами $\theta$ – угол крена, $\Delta\psi$ – угол тангажа;

$G$ – количество эталонных РЛИ для каждого типа КА $v_j$.

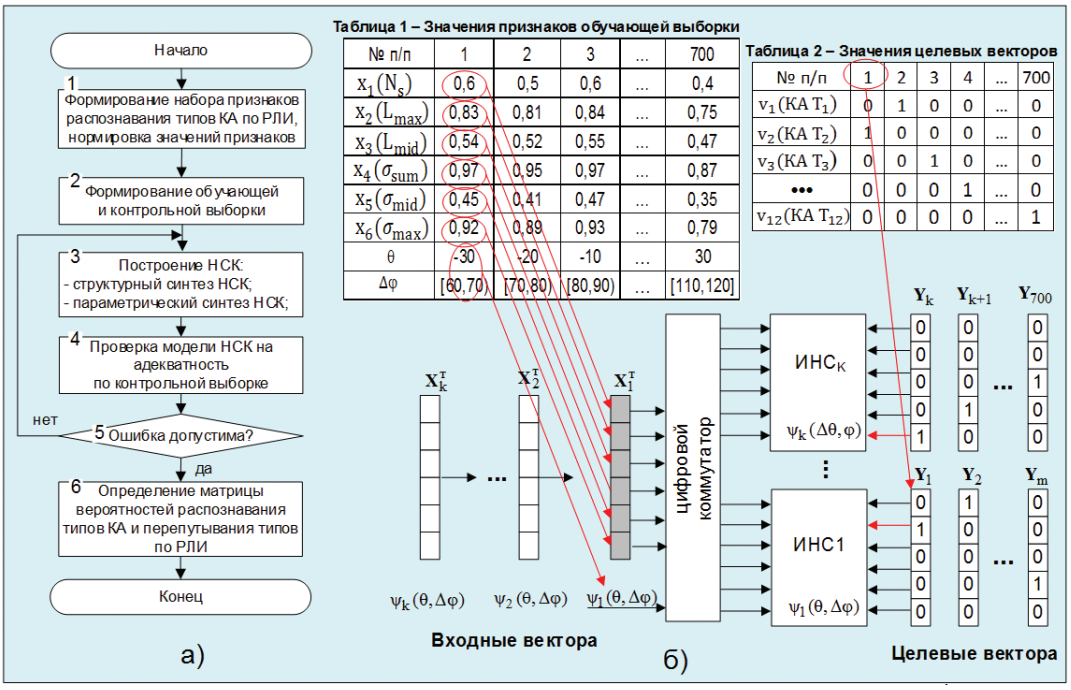



**Рис. 2.** Модель НСК на основе трехслойного персептрона:
а) структурно-логическая схема формирования модели НСК; б) схема обучения НСК

На ***третьем*** шаге производится формирование модели нейросетевого классификатора (НСК) и его обучение для распознавания типа КА, которое включает (*рисунок* 2):

- структурный синтез ИНС

$$S_{net} = <T_n, N_l, N_n, N_r, F_a, M_S>,$$

включающий определение типа ИНС $T_n$, количества слоев $N_l$, количества нейронов в слоях $N_n$, количество нейронных связей $N_r$, функции активации $F_a$, и метод обучения ИНС $M_S$.

- вторичная обработка РЛИ

$$M\,[RI_j(\psi)] = RI'_j(\psi),$$

состоящая из процедур сглаживания спекл-шума и пороговой обработки пикселей;

- получение значений вектора признаков

$$\mathbf{X^T} = \{x_1^T, ..., x_6^T\}$$

распознавания разноракурсных РЛИ с помощью процедуры кластеризации пикселей на основе метода *K*-внутригрупповых средних (*K*-means);

- разбиение диапазонов изменения ракурса КА по углам крена и тангажа на поддиапазоны $\psi_j = \psi\,(\theta, \Delta\psi)$, $\theta = \{-30, -20, -10, 0, 10, 20, 30\}$, $\Delta\varphi_1 = [60, 80)$, $\Delta\varphi_2 = [80, 100)$, $\Delta\varphi_3 = [100, 120]$, внутри которых изменение ракурса не приводит к существенному изменению РЛИ;

- формирование обучающей и контрольной выборки для обучения НСК

$$\mathbf{S^T} = \{s_\eta^T, \eta = \overline{1, 700}\},\ s_\eta^T = \langle X_\eta^T, u_i\rangle;$$

- параметрический синтез ИНС, включающий обучение ИНС с помощью обучающей выборки $\mathbf{S^T}$, оценку обобщающей способности распознавания ИНС по контрольной выборке, определение полной матрицы вероятностей распознавания типов КА $P_{расп}$ и ошибок определения типов КА.

Структурная схема *k*-го каскада НСК на основе трехслойного персептрона с методом обратного распространения ошибки и сигмоидальными функциями активации представлена на *рисунке* 3.

На ***четвертом*** шаге производится идентификация маневрирующего КА $a_z$, включающая два основных этапа: распознавание класса КА с помощью БК на основе признаков КИ и НКИ и распознавание типа КА с помощью НСК на основе признаков РЛИ.

При идентификации маневрирующего КА выполняются следующие действия:

- получение КИ, НКИ, разноракурсных РЛИ при условии прохождения КА $a_z$ в зонах действия ИС СККП на *q*-м витке орбиты;
- определение значений вектора признаков $\mathbf{X^k}$ КА на *q*-м витке, нормирование значений признаков;
- распознавание класса КА с помощью БК

$$F^k: X^k \to u_i$$

- определение ракурса КА на *h*-м РЛИ

$$M\,(RI_h)\ \ RI_h(\psi_g),\ \psi_g = \psi_k(\theta, \Delta\psi);$$

- вторичная обработка РЛИ

$$M\,[RI_h(\psi_g)] = RI'_h(\psi_g);$$

- вычисление вектора признаков распознавания типа КА $\mathbf{X^T}$ по *j*-му РЛИ $RI'_h(\psi_g)$ с помощью процедуры кластеризации

$$M^{Kl}\left[RI'_h(\psi_g)\right] \to X^T,$$

нормирование значений признаков;

- распознавание типа КА с помощью *k*-го каскада НСК

$$F^T(X^T) \to v_j,$$

обученного по РЛИ КА с ракурсом

$$\psi_g = \psi_k(\theta, \Delta\psi);$$

- определение вероятности распознавания типа КА

$$P_{расп}(v_j \mid a_z).$$

На ***пятом*** шаге производится проверка выполнения условия:

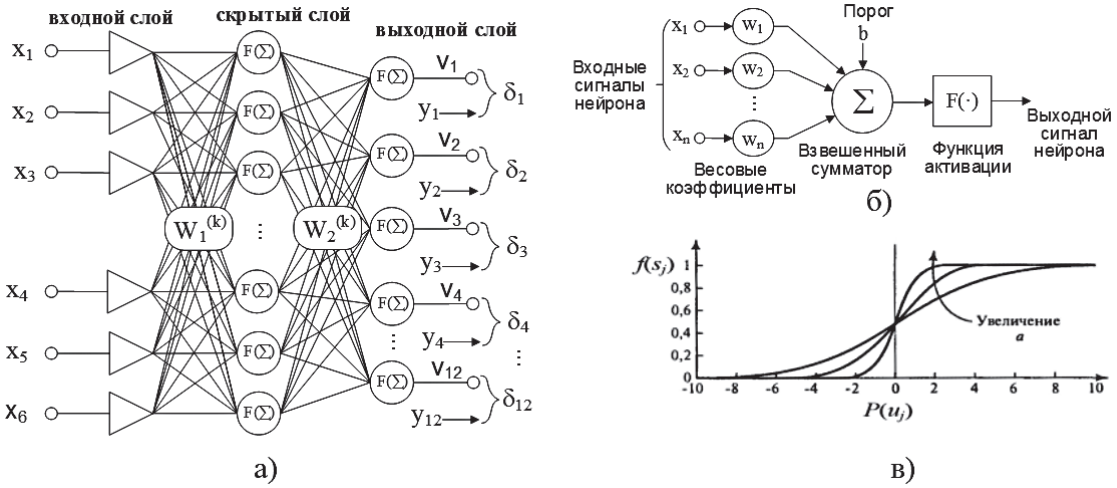



Рис. 3. Структура *k*-го каскада НСК:
а) структурно-параметрическая схема *k*-го каскада НСК;
б) формальная модель нейрона;
в) зависимость сигмоидальной функции активации нейрона от параметра наклона

ЕСЛИ $P_{расп}(v_j|\ a_z) \geq P_{доп}$,
ТО принимается решение о принадлежности КА $a_z$ к типу $v_j$,
ИНАЧЕ ЕСЛИ $T_{расп} \leq T_{треб}$,
ТО продолжение получения КИ, НКИ и РЛИ по КА $a_z$.

Если в результате идентификации маневрирующего КА определено, что класс и тип КА соответствуют КА требуемого назначения, то производится выдача данной информации потребителю.

## 2. Анализ эффективности разработанной методики

Для оценивания эффективности разработанной методики проведено имитационное моделирование процесса идентификации двенадцати типов КА с использованием разноракурсных РЛИ.

Имитационное моделирование проводилось с использованием метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) [1]. Для моделирования была разработана специальная статистическая модель, на основе которой было реализовано многократное повторение процесса идентификации маневрирующих КА для каждого из рассматриваемых типов. В результате моделирования было проведено 1000 опытов.

По результатам имитационного моделирования получены значения полной матрицы вероятностей правильного распознавания и вероятностей ошибок распознавания для двенадцати типов КА при использовании разработанной методики, приведенные в *таблице* 1.

По диагонали таблицы представлены значения условных вероятностей правильного распознавания типов КА. В остальных ячейках представлены значения условных вероятностей ошибок распознавания типов КА. Полная матрица вероятностей распознавания типов КА имеет вид

$$P_{S+1} = \|P_{ij}\| = \begin{pmatrix} P_{рас}(v_1) & P_{ош}(v_1|v_2) & \cdots & P_{ош}(v_1|v_S) \\ P_{ош}(v_2|v_1) & P_{рас}(v_2) & \cdots & P_{ош}(v_2|v_S) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{ош}(v_S|v_1) & P_{ош}(v_S|v_2) & \cdots & P_{рас}(v_S) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $P_{рас}(v_j)$ – условные вероятности распознавания типов КА $v_j$ (расположены по главной диагонали);
$P_{ош}(v_i|\ v_j)$ – условные вероятности ошибок распознавания типов КА (перепутывания типов КА $v_i$ и $v_j$);
$S$ – количество типов КА ($S = 12$).

Ситуации, соответствующие каждому столбцу матрицы вероятностей (1), образуют полную группу событий, т.е.

$$\sum_{i=1}^{S}\left(P_{рас}(v_j) + P_{пт}(v_i|v_j)\right) = 1.$$

На *рисунке* 4 представлены графики зависимости средней вероятности ошибок распознавания типов КА $P_{ош}(S)$ от количества распознаваемых типов $S$. Пунктирной красной линией показан график зависимости средней вероятности ошибок распознавания при идентификации КА по признакам КИ и НКИ без использования разноракурсных РЛИ. Сплошной линией синего цвета показан график зависимости средней

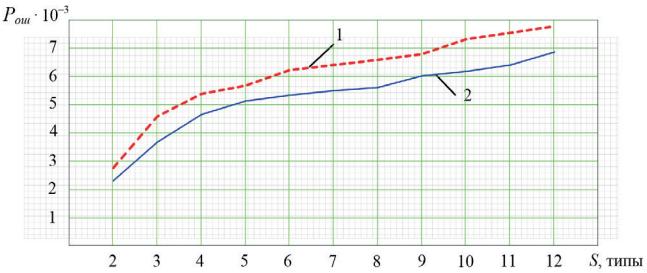



**Рис. 4.** Графики зависимости средней вероятности ошибки распознавания типов КА от количества распознаваемых типов $S$:
1 – идентификация КА без использования РЛИ;
2 – идентификация КА с использованием признаков РЛИ

**Таблица 1**
Матрица вероятностей распознавания типов КА НСК

| | v1 | v2 | v3 | v4 | v5 | v6 | v7 | v8 | v9 | v10 | v11 | v12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| v1 | 0,910 | 0,008 | 0,007 | 0,008 | 0,009 | 0,010 | 0,007 | 0,009 | 0,009 | 0,007 | 0,007 | 0,009 |
| v2 | 0,008 | 0,92 | 0,006 | 0,009 | 0,007 | 0,005 | 0,009 | 0,007 | 0,008 | 0,006 | 0,008 | 0,007 |
| v3 | 0,007 | 0,006 | 0,94 | 0,007 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,003 | 0,006 | 0,005 | 0,003 | 0,006 |
| v4 | 0,008 | 0,009 | 0,007 | 0,92 | 0,006 | 0,008 | 0,007 | 0,005 | 0,008 | 0,009 | 0,004 | 0,009 |
| v5 | 0,009 | 0,007 | 0,005 | 0,006 | 0,93 | 0,009 | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,008 | 0,004 | 0,006 |
| v6 | 0,010 | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,009 | 0,91 | 0,010 | 0,007 | 0,009 | 0,010 | 0,006 | 0,010 |
| v7 | 0,007 | 0,009 | 0,006 | 0,007 | 0,006 | 0,010 | 0,93 | 0,004 | 0,005 | 0,008 | 0,004 | 0,004 |
| v8 | 0,009 | 0,007 | 0,003 | 0,005 | 0,005 | 0,007 | 0,004 | 0,94 | 0,004 | 0,009 | 0,003 | 0,004 |
| v9 | 0,009 | 0,008 | 0,006 | 0,008 | 0,005 | 0,009 | 0,005 | 0,004 | 0,92 | 0,009 | 0,007 | 0,01 |
| v10 | 0,007 | 0,006 | 0,005 | 0,009 | 0,008 | 0,010 | 0,008 | 0,009 | 0,009 | 0,91 | 0,009 | 0,01 |
| v11 | 0,007 | 0,008 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,007 | 0,009 | 0,94 | 0,005 |
| v12 | 0,009 | 0,007 | 0,006 | 0,009 | 0,006 | 0,010 | 0,004 | 0,004 | 0,010 | 0,01 | 0,005 | 0,92 |

вероятности ошибок распознавания при идентификации КА с использованием признаков КИ и НКИ и разноракурсных РЛИ.

Сравнение зависимостей, представленных на *рисунке* 4, показывает, что использование при идентификации маневрирующих КА признаков разноракурсных РЛИ в дополнении к признакам КИ и НКИ приводит к снижению вероятности ошибок распознавания типов КА на 12%.

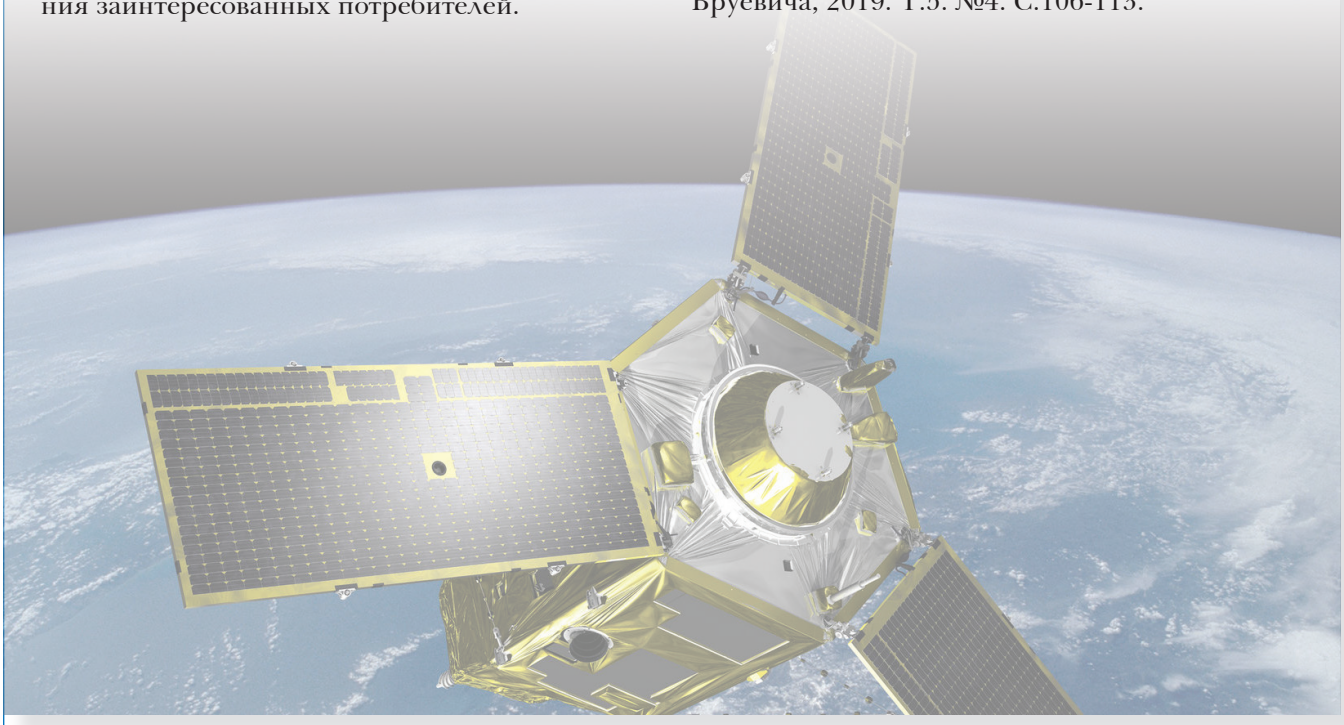
В эксперименте по идентификации маневрирующих КА всего участвовало 40 КА. Алфавит состоял из 12 типов КА. Время идентификации $T_{треб}$ ограничивалось 3 суткам. Требуемое качество идентификации КА $P_{доп}$ = 0,9. Результаты имитационного моделирования, представленные на *рисунке* 4 показали, что использование маневрирущих КА признаков разноракурсных РЛИ совместно с признаками КИ и НКИ, позволяет повысить количество идентифицированных маневрирующих КА с требуемым качеством на 10%. Это подтверждает эффективность разработанной методики.

## Заключение

Таким образом, предложенная методика распознавания маневрирующих КА в СККП на основе нейросетевой классификации разноракурсных РЛИ синтезирована на основе байесовского и нейросетевого классификаторов, использующих для распознавания КИ и НКИ. Данная методика может быть использована в Центре контроля космического пространства при идентификации маневрирующих КА иностранных государств в целях информационного обеспечения заинтересованных потребителей.

## Литература

1. Бусленко Н.П. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах / Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1970. 228 с.
2. Горелик А.Л. Методы распознавания / А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1984. 208 с.
3. Гусеница Я.Н. Моделирование информационных средств контроля космического пространства, функционирующих в условиях динамически изменяющейся космической обстановки / Я.Н. Гусеница, М.А. Завалишин, У.А. Пестун // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 2011. №632. С.44-49.
4. Ладыгин А.И. Анализ сигнатур. Теория и практика радиолокационного распознавания космических объектов & Космические трагедии глазами аналитиков сигнатур. М.: Университетская книга, 2008. 256 с.
5. Ладыгин А.И. Основы теории радиолокационного распознавания космических объектов. М.: МВУРЭ ПВО, 1997. 234 с.
6. Аджемов С.С., Виноградов А.Н., Терешонок М.В., Чиров Д.С. Способ распознавания космических аппаратов по редуцированным радиолокационным изображениям // Патент Российской Федерации № 2620727/13. 2017. Бюл. №16.
7. Кадочников А.П. Формирование моделей радиолокационных изображений в виде стохастических дифференциальных уравнений для распознавания космических объектов / А.П. Кадочников, А.А. Казанцев, О.А. Мишуков, С.А. Шигорев. СПб.: СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2019. Т.5. №4. С.106-113.



УДК 623.44

# СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОРУЖИЯ, ЭКИПИРОВКИ И СРЕДСТВ СВЯЗИ БОЕВЫХ ПЛОВЦОВ

# THE STATE AND MAIN DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF WEAPONS, EQUIPMENT AND COMMUNICATIONS OF COMBAT SWIMMERS

Ольга Юрьевна Каширина
*кандидат технических наук*
*профессор АВН*
помощник депутата Государственной Думы
Федерального Собрания РФ
старший специалист
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

Елена Ивановна Каширина
*кандидат исторических наук*
*член-корреспондент АВН*
доцент кафедры компьютерных технологий
и информационной безопасности
КубГТУ
Адрес: 350072, г. Краснодар,
ул. Московская, д. 2
Тел.: 8 (612) 255-84-01

Владимир Владимирович Кулаков
*доктор исторических наук, профессор*
*действительный член АВН, МАН, МАТК*
профессор
Финансовый университет при Правительстве РФ
Адрес: 125993, Москва,
Ленинградский проспект, д. 49
Тел.: 8(499) 943-98-55

Александр Григорьевич Мурашов
вице-президент
руководитель обособленного подразделения
МОУ «ИИФ» в Москве
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8 (4967) 35-31-93

Владимир Анатольевич Шаманов
*Герой Российской Федерации*
*доктор технических наук*
Председатель Комитета по обороне
Государственной Думы
Федерального Собрания РФ
профессор
Финансовый университет
при Правительстве РФ
Адрес: 103265, Москва, ул. Охотный ряд, д. 1
Тел.: 8 (495) 692-62-66

**Аннотация**

В статье проводится обзор стрелкового оружия, имеющегося на вооружении боевых пловцов различных государств, отдельных элементов их экипировки и средств связи. Авторы предлагают сравнительный анализ образцов оружия, указывают сильные и слабые стороны каждого образца вооружения. Обозначаются основные проблемы в разработке оружия для боевых пловцов и направления научных изысканий по его совершенствованию.

**Ключевые слова:** пистолет, автомат, двухсредное оружие, боевой пловец, водолаз, игловидная пуля, боеприпас, боевой нож, экипировка, костюм с электрообогревом, низкочастотная связь, система связи, организация взаимодействия, гидроакустика, электромагнитные волны.

**Summary**

The article provides an overview of small arms that are in service with combat swimmers of various States, individual elements of their equipment and means of communication. The authors offer a comparative analysis of weapons samples, indicate the strengths and weaknesses of each weapon sample. The main problems in the development of weapons for combat swimmers and directions of scientific research on their improvement are outlined.

**Keywords:** gun, submachine gun, two-medium weapon, combat swimmer, diver, needle bullet, ammunition, combat knife, equipment, suit with electric heating, low frequency communication system of communication, organization of interaction, underwater acoustics, electromagnetic waves.

Попытки проводить специальные операции под водой известны с древних времен. В 480 году до нашей эры древнегреческий историк Геродот описал уничтожение флота персидского царя Ксеркса, состоявшего из 200 кораблей. Тогда греки обрезали якорные канаты кораблей противника, а шторм разбросал их и разрушил. Подобные акции периодически проводились во все времена, всеми флотами и армиями мира и часто определяли исход кампании. Тактика действий таких операций постоянно совершенствовалась. Однако вплоть до середины XX века основным оружием подводных диверсантов являлся нож. Только в шестидесятые годы прошлого столетия конструкторы разных стран приступили к разработке специального подводного оружия.

В СССР в 1970 году был создан отряд специального назначения «Дельфин». А с 1981 года началась подготовка боевых пловцов на базе отряда «Вымпел» под эгидой Главного Управления КГБ СССР. Данные подразделения были малочисленные, но они предназначались для выполнения важных стратегических задач. В случае развязывания агрессорами войны отряды боевых пловцов должны были вывести из строя системы управления войсками противника, уничтожить военно-морские базы, элементы противовоздушной обороны, захватить и удержать важные объекты до подхода основных сил. Эти подразделения успешно проводили специальные операции в бассейнах стран Юго-восточной Азии и Ближнего Востока, осуществляли подготовку соответствующих специалистов дружественных СССР стран, разрабатывали и совершенствовали тактику действий разведывательно-диверсионных групп и организацию взаимодействия между ними. Особые группы подводных бойцов обороняли советскую военно-морскую базу в Эфиопии, охраняли суда на рейде и в портах некоторых африканских и латиноамериканских стран, обезвреживали отдельные взрывоопасные предметы и проводили разминирование на Красном море и в Персидском заливе.

Сегодня подразделения боевых пловцов – это специальные подразделения, выполняющие задачи по охране от диверсионных действий важных коммуникационных объектов и военных баз, портов и различных судов, а также непосредственно осуществляющие, в случае необходимости, диверсионные рейды в акваториях противника. Подразделения боевых пловцов имеют практически все армии мира. Российские спецподразделения оснащены самыми современными техническими средствами, способны обнаруживать подводные объекты за сотни метров, уничтожать противника специальным стрелковым оружием. Экипировка боевых пловцов обеспечивает возможность быстрого перемещения под водой, при необходимости ими используются различные транспортные средства: буксировщики, обычные и сверхмалые подводные лодки. Для организации связи применяют низкочастотные малогабаритные радиостанции.

Создать подводное стрелковое оружие длительное время не удавалось по причине высокой плотности воды, попадание которой в ствол вызывало его разрыв. На Западе первыми подводное оружие стали разрабатывать инженеры из США. В 1964 году американский инженер Фрэнк В.Либераторе создал один из образцов такого оружия. Оно было достаточно примитивным и представляло собой шест (трость) с закрепленной на нем «мортирой». Это маленькое орудие стреляло винтовочным патроном. Под мортирой располагался своеобразный шип, который исполнял роль спускового курка. В случае опасности (нападение диверсанта или морского хищника) необходимо было этим шипом ударить объект, только после этого происходил выстрел. В 1987 году Гарри Бумфер (США) усовершенствовал данное оружие. Он перенес курок на противоположный конец шеста. Теперь можно было прицельно стрелять на небольшие расстояния. Оружие получило громкое название «Акулья сабля». Другой американский инженер – Ворхес – продолжил работы Бумфера и существенно усовершенствовал это оружие. Он добавил к базовой системе пару дополнительных стволов.

Подводный пистолет одним из первых изготовил сотрудник корпорации AAI Р.Барра. Его револьвер, разработанный в 1969 году, представлял собой простой шестиствольный пистолет с вращающимся бойком. Револьвер находился в пенопластовом корпусе, который не позволял ему утонуть. Для него были созданы специальные боеприпасы, они имели вид пули-иглы. Похожую модель создал Ф.Стивенс, соотечественник Барра. Его револьвер имел вращающийся блок из шести стволов по американской системе калибра 38 (по отечественной – 9,0; 9,3). Пистолет также стрелял иглами (стрелами) [1].

В 1964 году инженер из Америки Чандли Вильям Ламберт разработал реактивное ружье. Его основу составляла конструкция из 12 соединенных стволов, одновременно являющихся и патронами. Из них выпускались стреловидные пули. Данное ружье получилось громоздким, неудобным и тяжелым, поэтому для его удержания предусматривались две рукоятки.

В. Барра в 1978 году создал подводную гарпунную винтовку. Основная конструкция – блок из 13 стволов – у нее вращалась, последовательно подходя к одному из трех бойков: один для центрального ствола и по одному на каждое кольцо (внешнее и внутреннее), образованное барабаном из стволов. Применяемые стреловидные боеприпасы с казенной части имели пороховой реактивный двигатель. Для перезаряжания винтовки требовалось отделить этот барабан, снарядить его, после чего вновь вставить его в корпус винтовки и оружие было готово к боевому применению [2].

Известны еще несколько необычных экземпляров с нестандартными техническими особенностями. К ним можно отнести трехствольные гладкоствольные ружья и ружье-миномет, заряжающиеся с передней части ствола. Определенный интерес вызывают реактивные боеприпасы «Lancejet» разработанные в США кампанией М.В.А. Они представляли собой легкие 30-ти сантиметровые снаряды калибра 6,4-мм с твердотопливным реактивным двигателем. Снаряд запускался с шестизарядной или однозарядной установки и надежно поражал типовую цель (боевого пловца, легкое транспортное средство) на дальности до восьми метров и глубине до 30 метров. Однако все реактивные боеприпасы имели один существенный недостаток – низкую точность стрельбы и большое рассеивание. Например, при стрельбе из ружья «Ланседжет» на дальности 6-8 метров в мишень диаметром 40 см попадала лишь половина снарядов [3].

В 1971 году в ФРГ появился четырехствольный подводный пистолет BUW-2. Он оснащался активно-реактивными пулями. В это же время были анонсированы двухсредные пневматические пистолеты. Патроны этих пистолетов содержали длинные 30-60 миллиметровые пули (иглы) калибра 4,5 мм. Утверждалось, что они могут снаряжаться ампулами с отравляющими веществами. Однако достоверность подобных сведений не подтверждена (требуемое давление газа в канале ствола должно быть около 2000 кг/м$^2$, чего можно достичь только при использовании порохового заряда) [4].

Другой немецкий пистолет – P11 имел сменный блок, состоящий из пяти стволов, снаряженных боеприпасами с электрокапсюлями на заводе-изготовителе. Перезаряжание оружия боевым пловцом невозможно, это делается в заводских условиях. Пистолет обеспечивает легкий спуск, однако из-за электрической проводимости воды его надежность вызывает определенные сомнения. Пистолеты данного типа и сегодня состоят на вооружении боевых пловцов Германии, Италии, Франции, Норвегии, Великобритании, США и других стран. Для пистолета P11 были разработаны специальные боеприпасы калибра 7,62-мм, с длинными иглообразными пулями, хорошо стабилизирующиеся в воде. Они находятся в пятизарядном блоке стволов, устанавливаемых на рамку оружия с пистолетной рукояткой. После отстрела всех 5 зарядов блок стволов снимается. Две девятивольтовые аккумуляторные батареи, находящиеся в рукояти пистолета, служат источниками питания для воспламенения зарядов. Эффективная дальность стрельбы из данного пистолета составляет до 15 метров под водой и до 30 метров на воздухе.

В 1970 году началась разработка отечественного подводного пулеметного комплекса. И уже в 1972 году был создан его опытный образец – подводный пулемет АГ-26. Подача патронов осуществлялась посредством гибкой ленты емкостью 26 патронов. На глубине 20 метров пуля, выпущенная из пулемета, должна была пробивать деревянный щит толщиной 25мм с закрепленной на его оборотной стороне металлической пластиной толщиной 0,5мм на дальности 15 метров [5]. Одновременно испытывался автомат того же калибра. По их результатам выяснилось, что и автомат, и пулемет обладают схожими тактико-техническими характеристиками. Доведение пулеметного комплекса было прекращено.

Особый интерес представляют и другие советские образцы стрелкового оружия боевых пловцов, в частности, созданные в 70-х годах XX века 5,66 мм автомат АПС (автомат подводный специальный) и четырехствольный 4,5 мм пистолет СПП-1 (специальный подводный пистолет). Сразу после представления их широкой публике, они привлекли внимание специалистов всего мира, поскольку создание надежного подводного стрелкового оружия в то время на Западе считалось проблемой навсегда неразрешимой.

В 1971 году пистолет СПП-1, а в 1975-м автомат АПС были приняты на вооружение в СССР. Эффективная дальность применения автомата под водой – до 20 метров, на суше – до 30 метров. Автомат стреляет длинными (от 90 до 120 мм) пулями-иглами. Стволы в СПП-1 гладкие, собраны в единую конструкцию. Выстрелы последовательно производятся из каждого ствола. Заряжание осуществляется сразу четырьмя патронами, закрепленными в обойме, стволы при этом не отделяются, а проворачиваются на оси вниз, частично извлекая из них стреляные гильзы. Масса пистолета 950 гр., начальная скорость

при стрельбе на суше 250 м/с. Пистолетная пуля имеет особую конструкцию головной части, которая позволяет образовывать при движении под водой каверну – газовый пузырь. Благодаря такому простому инженерному решению в этом пузыре пуля-игла приобретает способность к стабильному движению.

Главной особенностью подразделений боевых пловцов в настоящее время является то, что им приходится действовать как на суше, так и под водой. А это значит, что для выполнения широкого спектра задач на их снабжении должно быть специальное многоцелевое, двухсредное оружие, причем такое, которое по эффективности стрельбы на суше было бы максимально приближено к 5,45-мм автомату Калашникова, а при стрельбе под водой – к 5,66-мм автомату АПС. Тенденция объединения двух систем оружия в одну в последнее время является приоритетной при создании новых комплексов вооружения. Данная комбинация средств позволяет не только значительно повысить технический уровень и функциональность вооружения, но и сократить потребное количество единиц оружия, что приводит к значительной экономической выгоде. Задача может быть решена посредством применения на суше и под водой различных типов боеприпасов при незначительной доработке самого автомата.

Пока же боевые пловцы на берегу используют такие образцы стрелкового вооружения, как автомат Калашникова (Россия), автоматические винтовки типа М16 (США), пистолет-пулемет MP5 (Германия) и др., а под водой: пистолет П-11 (Германия), пистолет подводный оборонительный Mk1 (США), а также упомянутые отечественные – СПП и АПС. Использование этого оружия в непредназначенной для него среде не только не эффективно, но и становится опасным. Так, например, автомат Калашникова АК-74 способен поражать на суше любые цели на расстоянии до 500 метров. При стрельбе же под водой пули штатных патронов более или менее стабильно пролетают расстояние всего лишь в один метр, а затем траектория их полета становится непредсказуемой. К тому же при попадании воды в канал ствола АК-74 разрушается. Автомат подводный специальный (АПС) может использоваться в двух средах. Он эффективен при стрельбе под водой на дальностях до 25 м, однако на суше его эффективность не очень высока: из него невозможно попасть в щит размером 1×1 метр на дальности от 50 метров. К тому же, прочностные характеристики его отдельных деталей, например, ствольной коробки, таковы, что стрельба на суше из него нецелесообразна (в технических условиях применения данного оружия указано, что количество выпущенных из автомата на суше патронов не должно превышать 180 (под водой – 2000 выстрелов), а стрельба в автоматическом режиме вообще не рекомендуется). Тем не менее, оружия, подобного отечественному автомату АПС, на Западе нет. А зарубежные образцы подводных пистолетов по основным параметрам существенно отстают не только от российских, но и от советских образцов. По мощности они значительно уступают советскому СПП, и, конечно, автомату АПС (убойная сила пули у зарубежных образцов составляет немногим более 10 метров).

Автомат АПС может стационарно устанавливаться на специальных транспортных средствах для перемещения боевых пловцов под водой. Масса автомата, снаряженного боеприпасами, составляет 3,4 кг, без боеприпасов – 2,46 кг. АПС компактен и не намного превышает размеры АК-74. Стрельба из него ведется одиночными выстрелами или очередями. Начальная скорость пули в воздухе составляет 365 м/с. К автомату предусмотрены 5,66-мм боеприпасы, которые размещаются в коробчатом магазине емкостью 26 патронов [5].

Модернизацией АПС явилась двухсредная модель – автомат двухсредный специальный (АДС). Эффективная стрельба под водой обеспечивается патронами СПС 4,5х40 мм, а на суше – стандартными патронами 5,45×39 мм. Для этого необходимо сменить один магазин на другой, снаряженный иными боеприпасами. Если нет времени, то можно просто переключить оружие из режима «вода» в режим «воздух». Автомат выполнен в компоновке «булл-пап». Кроме того, он имел оптический и ночной прицел, фонарь и лазерный целеуказатель. Таким образом, автомат превратился в стрелково-гранатометный комплекс («обвес» автомата, в том числе, включал 40-миллиметровый подствольный гранатомет). К нему был разработан принципиально новый патрон, стальная пуля в нем утапливалась в гильзу на большую часть своей длины [6,7]. К настоящему времени АДС принят на вооружение, но до сих пор требует доводки, так как в отдельных случаях автомат может не соответствовать требованиям безопасности

Кроме стрелкового оружия для боевых пловцов и водолазов разработано несколько типов ножей. Водолазный нож отличается от ножа подводного диверсанта. Хотя основные его основные элементы: клинок, гарда, рукоятка такие же, но нож боевого пловца сбалансирован, что позволяет применять его на суше как метательное оружие. На вооружении боевых плов-

цов ВМС стоят хорошо зарекомендовавшие себя универсальные ножи НВУ (нож водолазный универсальный). На верхней части клинка имеется серрейтор – пилообразная поверхность для перепиливания канатов, стальных тросов и др. Ножны изготовлены из пластмассы, на них есть приспособления для крепления ножа на предплечье или голени пловца. Если нож выронить, то падая на дно, он воткнется в него и будет стоять рукоятью вверх. Один из вариантов ножа – антимагнитный НВУ-АМ. По конструкции он аналогичен НВУ, но не имеет серрейтора.

Другой нож, который используют боевые пловцы – это нож разведчика НРС-2. В свое время он был разработан для сухопутных операций, но его практически сразу стали использовать и боевые пловцы. Он именуется как «нож разведчика специальный», иногда «нож разведчика стреляющий» (НРС-2). Ввиду того, что изначально он предназначался для использования на суше, нож не вполне подходил подводным диверсантам. Он был не сбалансирован, его клинок короче, чем у НВУ. Однако НРС-2 оснащался стреляющим устройством, находящимся в рукоятке, а выстрел, производимый специальным патроном СП-4, был бесшумен. Но стрельбу можно было вести только на воздухе. Эффективная дальность при стрельбе патроном СП-4 – 20-25 метров.

Еще один нож боевого пловца – «Катран». Он называется боевым ножом аквалангиста. В начале девяностых годов XX века командование ВМС РФ решило заменить им нож НВУ. Этот нож могли использовать и боевые пловцы, и водолазы. «Катран» разрабатывался как подводный нож для аквалангистов, но получилось так, что на флот он поступил позже, чем в Сухопутные войска. Нож получился надежным и удачным [8].

Американцы уделяли не меньшее, если не большее, внимание холодному оружию для боевых пловцов. Кампанией WASP Injection Systems был создан многофункциональный нож WASP Injector Knife. Он предназначался как для действий под водой, так и на суше. Его особенностью было то, что в рукояти ножа предусматривался съемный сифон со сжатым до давления 60 атмосфер воздухом. От рукояти по всей длине клинка проделан канал, по которому сжатый газ при нажатии кнопки устремляется в тело морского хищника или пловца и разрывал его. Специалисты кампании WASP Injection Systems утверждают, что полученные увечья и шок после удара таким ножом, исключают возможность продолжения нападения как хищника, так и человека. Под водой действие оружия усиливается. Так как после разрыва тканей и впрыскивания газа в тело жертвы, оно теряет плавучесть и всплывает на поверхность. Для замены баллончика с зарядом необходимо открутить рукоятку и вставить другой [9].

Таким образом, на данный момент времени двухсредное оружие представляет собой новый класс вооружения, становление которого все еще находится на начальной стадии развития. Разработка его облика, обоснование требований к нему является не только актуальной, но и первостепенной задачей. Некоторые результаты проведенного анализа представлены в *таблице 1*.

Отдельно следует остановиться на организации взаимодействия и управления боевыми пловцами в ходе выполнения специальных операций. Как отмечалось, низкие частоты (до 100 Гц) пригодны для связи под водой. Но сложность реализующих эту связь передатчиков, их громадные размеры и высокое энергопотребление, крайне низкие быстродействие и помехо-

**Таблица 1**

Характеристики основных образцов подводного стрелкового оружия

| Параметр \ Страна | Россия | | | США | | | Германия |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Тип оружия | СПП-1 | АПС | АДС | Пневмат пистолет. | 6 / 1 ПУ | Lancejet | BUW-2 |
| Калибр, мм | 4,5 | 5,56 | 5,45 | 6,4 | 6,4 / | 13 | 6-8 |
| $V_0$, м/с | 250 | 360 | 330 | | 150 / | | |
| Тип питания | обойма | магаз. | магаз. | магазин | обойма | | обойма |
| К-во патронов | 4 | 26 | 26/30 | 15-20 | 6 / | 1 | 4 |
| Масса, кг. | 0,95 | 2,46 | | | 0,68/0,45 | | |
| Длина пули | 115 | 120 | | 150 | | | |
| Длина оружия | 244 | 620 | | | 456 / 456 | | |

защищенность исключают их практическое использование в настоящее время даже для подводных аппаратов.

Водолазы используют проводную связь, но боевым пловцам по известным причинам такой вид коммуникации не подходит. Им необходима только беспроводная связь. При этом она должна обеспечивать обмен информации между пловцами, с подводной лодкой (судном) и берегом. До последнего времени применялась оптическая и гидроакустическая связь. Звук в воде распространяется в 4 раза быстрее, чем в воздухе, а свет лазера синего и зеленого диапазона «пробивает» толщу воды лишь на несколько метров. Гидроакустические приемо-передатчики работают на УКВ частотах на дальности до 10 километров, они достаточно компактны. Однако такие системы недостаточно надежно передают сигнал в слоях воды разной плотности и температуры, кроме того, рельеф дна, морские течения и ледяной покров создают препятствия для прохождения сигналов. Для успешного применения оптики обязательна прямая видимость, строгая ориентация приемника и передатчика, отсутствие загрязнения источника излучения.

Отечественными учеными и конструкторами недавно была предложена система подводной связи IVA S/W – мобильный радиокомплекс беспроводной подводной связи, предназначенный для передачи информации и голосовых данных в морской и пресной воде, а также через границу раздела сред (вода–воздух). В ней полезно используются гидроакустическая и электромагнитные антенны. Эта система обеспечивает связь «пловец–пловец», «боевой пловец–подводная лодка» и «пловец–берег» на расстоянии более 100 метров при глубине до 30 метров. Радиостанция имеет небольшие размеры и массу до 4 кг. В водолазной маске подводного пловца вмонтированы легкие миниатюрные микрофон и динамики [10,11].

Среди задач, над решением которых работают в настоящее время конструкторы и специалисты, следует выделить не только задачу создания двухсредного оружия с эффективными поражающими возможностями, но и задачу устранения демаскирующих и мешающих стрельбе под водой признаков (в частности, уменьшению газового пузыря в результате выстрела), а также задачу совершенствования тактики применения оружия.

Помимо качественной связи под водой, решению поставленных перед боевыми пловцами задач способствует также их экипировка. Кроме ее основных элементов, таких как ласты, бронежилет, специальный аппарат для дыхания, нож, системы связи и так далее, главным остается костюм для подводного плавания (гидрокостюм или гидрокомбинезон). Именно он призван обеспечить качественную работу пловца в подчас суровых условиях на глубине до 40 метров с возможным значительным перепадом температур.

Комплект специального водолазного снаряжения включает в себя гидрокомбинезон «сухого» типа, он обеспечивает скрытое перемещение под водой, работоспособность в различных условиях, в том числе аварийных, а также маневренность и безопасность.

В экстремальных же условиях возможно использование специальных костюмов электрообогрева водолаза в качестве термобелья. Такой элемент экипировки предназначен для поддержания микроклимата организма человека при выполнении задач в условиях низких температур окружающей среды в воде и на суше.

Именно в этой связи Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (г. Серпухов) разработало уникальный материал с токопроводящими свойствами на основе металлизированной токопроводящей нити из искусственных волокон [12].

В частности, по заказу Министерства обороны Российской Федерации специалистами Межрегионального общественного учреждения «Институт инженерной физики» выполнены опытно-конструкторские работы по разработке костюмов электрообогрева в двух модификациях:

- костюм электрообогрева водолаза с активным обогревом головы, кистей рук и стоп ног;
- костюм электрообогрева для личного состава специальных подразделений.

Костюм с электрообогревом представляет собой термобелье с электрообогревом, которое обладает малым весом, не сковывает движения пловца при выполнении различных задач [13].

Температура обогрева автоматически поддерживается в диапазоне +30-35°С. Питание костюма осуществляется двумя литий-ионными аккумуляторными батареями, обеспечивающими работу системы обогрева в течение 5-6 часов. В костюме водолаза для обогрева головы, кистей рук и стоп ног предусмотрены отдельные термонагревательные флисовые элементы системы: шлем, перчатки и носки.

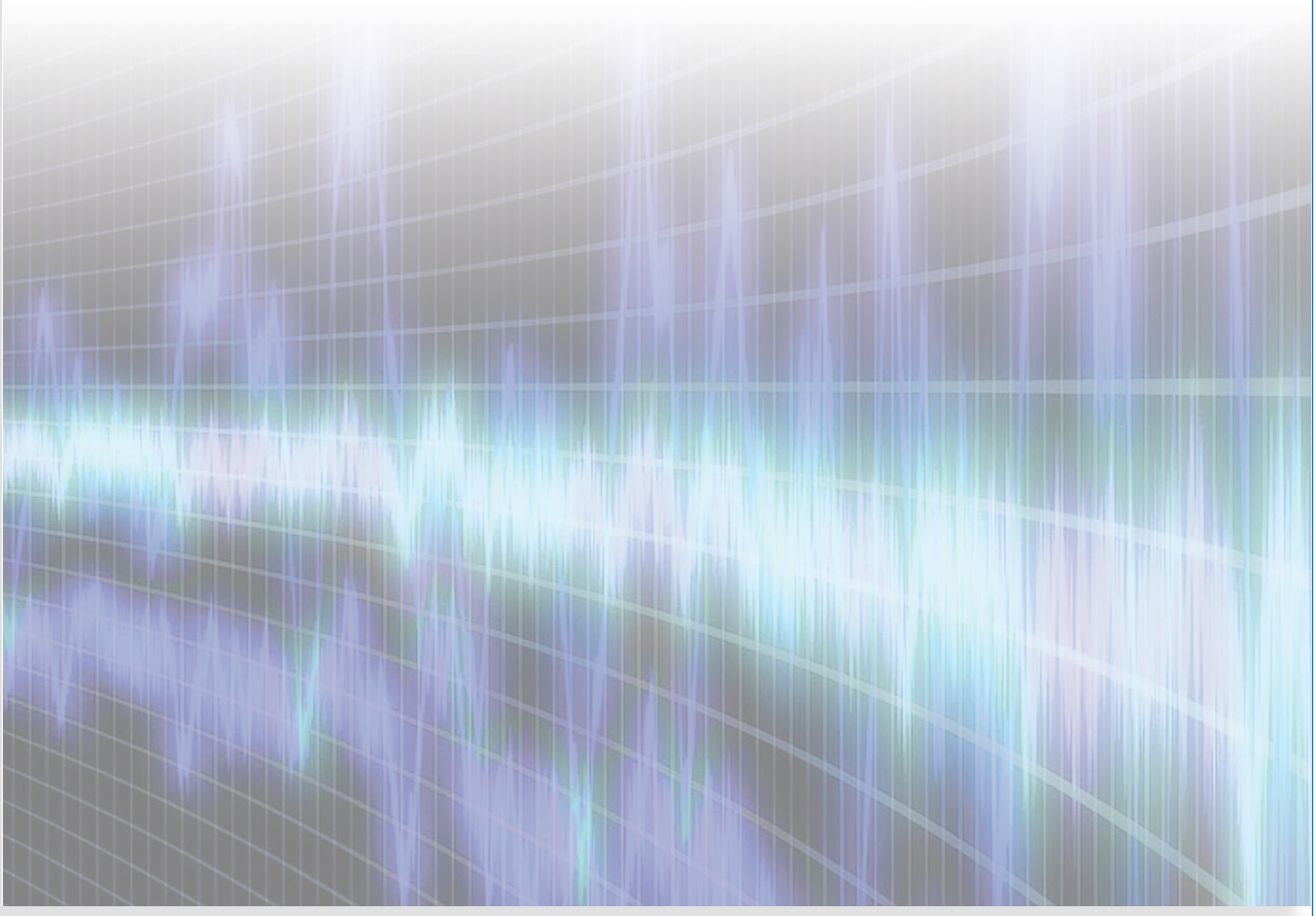
Данные костюмы прошли все виды испытаний в рамках проведенных опытно-конструкторских работ по заказам Министерства обороны Российской Федерации и приняты на снабжение в Вооруженных силах Российской Федерации.

Сегодня Вооруженные силы и иные силовые структуры Российской Федерации решают ком-

плекс задач в акваториях Черного, Средиземного и других морей. Новое стрелковое вооружение и надежная связь – залог успешного выполнения боевых задач на всех направлениях, пограничных акваториях и территориях дружественных государств.

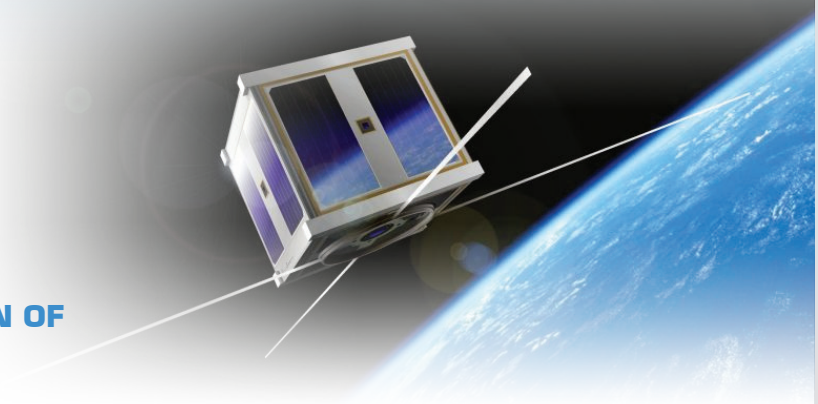
**Литература**

1. Оружие специальное, необычное, экзотическое: Иллюстрированный справочник/ А.Н. Ардашев, С.Л. Федосеев. М.: Астрель, 2003. 319 с.: ил.
2. Шаманов В.А. Принципы установления тенденций развития подводных стрелковых комплексов// Известия ТулГУ. Технические науки. Проблемы специального машиностроения, 2017. Вып.12. Ч.6. С.267-270.
3. Александр Иванов. Огнестрельное оружие боевых пловцов. Военное обозрение. 22 января 2014 //https://topwar.ru/38696-ognestrelnoe-oruzhie-boevyh-plovcov.html.
4. Юрий Данилов. Стрельба под водой // Солдат удачи. № 4, 1997. С.167.
5. Как создавался подводный пулемет для боевых пловцов ВМФ СССР. 4 февраля 2018. //https://topwar.ru/135226-kak-sozdavalsya-podvodnyy-pulemet-dlya-boevyh-plovcov-vmf-sssr.html.
6. «Двухсредный» автомат АДС // https://topwar.ru/20508-dvuhsrednyy-avtomat-ads.html.
7. Оружие боевых пловцов. 06.02.2019 г. // https://rostec.ru/news/groznoe-oruzhie-boevykh-plovtsov.
8. Ножи боевого пловца: «Катран» и «Морской дьявол» // https://army-news.org/2012/02/nozhi-boevogo-plovca-katran-i-morskoj-dyavol/.
9. Инжекторный нож WASP // //https://newatlas.com/wasp-injector-knife-massively-increases-the-lethality-of-the-hunters-l/9480/.
10. Евгений Балабас. Подводная связь в царстве Посейдона. Армейский стандарт. 02 октября 2018. https://armystandard.ru/news/t/2018102141-IRWAF.html.
11. IVA S/W Мобильный радиокомплекс беспроводной подводной связи // https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:IVA_S_W_.
12. Денисова О.А., Каширина О.Ю., Мурашов А.Г. Инновационные изделия локального обогрева на основе металлизированных токопроводящих нитей для поддержания температуры тела человека в условиях низких температур, в том числе в чрезвычайных ситуациях// Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях, 2019. №3. С. 66-73.
13. Костюм с электрообогревом // https://iifrf.ru/goods-and-services/goods/kostyum-s-elektroobogrevom.



УДК 629.7.058.53

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НАНОСПУТНИКА ФОРМАТА CUBESAT



# MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE LOCATION OF A CUBESAT NANOSATELLITE

Олег Игоревич Атакищев
*доктор технических наук, профессор*
заместитель генерального директора
по специальным проектам
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: aoi007@mail.ru

Алексей Николаевич Щитов
аспирант
Юго-Западный государственный университет
Адрес: 305040, г. Курск, ул.
50 лет Октября, д. 94
E-mail: a.n.schitov@mail.ru

Евгений Анатольевич Титенко
*кандидат технических наук, доцент*
доцент кафедры ИСиТ
Юго-Западный государственный университет
Адрес: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94
E-mail: johntit@mail.ru

Игорь Николаевич Бекетов
старший преподаватель кафедры ФВ
Юго-Западный государственный университет
Адрес: 305040, г. Курск, ул.
50 лет Октября, д. 94г
E-mail: fv-swsu@yandex.ru

Сергей Николаевич Фролов
*кандидат технических наук*
ведущий научный сотрудник ЦПИР
Юго-Западный государственный университет
Адрес: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94
E-mail: snfrolov@bk.ru

Андрей Николаевич Бекетов
старший преподаватель кафедры ФВ
Юго-Западный государственный университет
Адрес: 305040, г. Курск, ул.
50 лет Октября, д. 94г
E-mail: fv-swsu@yandex.ru

**Аннотация**

В статье рассматривается задача определения местоположения наноспутника по эталонным объектам, которыми являются воздушные суда (ВС) на которых установлена система автоматического зависимого наблюдения вещания (АЗН-В) передающая в в незашифрованном виде координаты ВС. В статье предложена математическая модель, позволяющая определять местоположения наноспутника формата CubeSat при помощи эффекта доплеровского сдвига частоты, математических формул угловой засечки и формул определения расстояния между объектами на координатной сетке топографической карты. Моделирование показало, что точность определения местоположения наноспутника не хуже известных методов, но созданная модель имеет низкую вычислительную сложность.

**Ключевые слова:** подвижный эталонный объект, наблюдение-вещание, триангуляция, эффект Доплера, диаграммы направленности.

**Summary**

The article discusses the problem of determining the location of a nanosatellite by reference objects, which are aircraft (AC) on which an automatic dependent broadcast surveillance system (ADS-B) is installed, which transmits the coordinates of the aircraft in unencrypted form. The article proposes a mathematical model that allows determining the location of a CubeSat nanosatellite using the Doppler frequency shift effect, mathematical formulas for angular intersection and formulas for determining the distance between objects on the coordinate grid of a topographic map. Modeling showed that the accuracy of determining the location of the nanosatellite is not worse than the known methods, but the created model has a low computational complexity.

**Keywords:** moving reference object, observation-broadcasting, triangulation, Doppler effect, directional patterns.

## Введение

Создание наноспутников формата CubeSat представляет естественное развитие космонавтики, которая имеет выгодные экономические показатели запусков и вывода на орбиту наноспутников по сравнению с макроспутниками и

космическим станциями [1-4]. Среди перспективных направлений применения наноспутников выделяются задачи дистанционного зондирования Земли, организации глобальной системы связи непрерывного мониторинга целевых объектов и территорий, в том числе задачи двойного назначения [5,6].

Современные наноспутники по массогабаритным показателям (вес до 10 кг) имеют ограниченные возможности оценки и определения собственного местоположения, что не позволяет решать задачи космического зондирования объектов Земли в любых точках околоземной орбиты. Применяемые наноспутники в большинстве случаев не имеют активной системы стабилизации и системы передачи координат, поэтому они не в состоянии определять свое местоположения по картам звездного неба или по снимкам земной поверхности. Вместе с тем наноспутники в состоянии принимать координаты от подвижных объектов (воздушных судов или космических станций), передаваемые с помощью датчиков системы автоматического зависимого наблюдения-вещания АЗН-В [7-10]. Также наноспутники могут получать информацию о приближении или удалении подвижных объектов на основе физических принципов измерения расстояний (эффект Доплера) [5]. Комбинация тригонометрических и физических принципов определения расстояний между подвижными объектами позволяет получить и оценить местоположение наноспутника.

В работе рассматриваются практически значимые случаи определения местоположения наноспутника при помощи эталонных подвижных объектов, расчет подобного типа местоположения наноспутника, выполняется на основе типовых вычислений. Он требует минимальной аппаратной поддержки, поэтому целесообразен в задачах, решаемых наноспутниками с форм-фактором CubeSat [11-14].

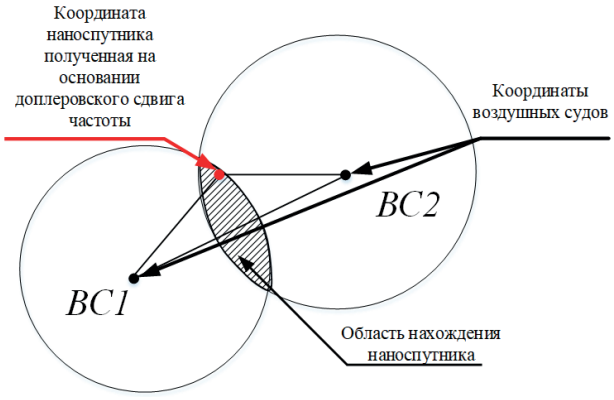



**Рис. 1.** Определение местоположения наноспутника по сигналам эталонных ВС

**Постановка задачи**

Рассматривается модель определения местоположения наноспутника при помощи доплеровского сдвига частоты. Она позволяет связать скорость движения эталонного подвижного объекта с частотой, которую будет регистрировать приемник координат, установленный на наноспутнике.

С каждого эталонного подвижного объекта при помощи системы АЗН-В наноспутник получает следующую информацию:

- координаты эталонного подвижного объекта;
- скорость эталонного подвижного объекта;
- мощность передатчика АЗН-В;
- трек движения эталонного подвижного объекта;
- высота эталонного подвижного объекта над поверхностью моря

Используя данную модель на основе доплеровского сдвига частоты, передатчика автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В), определяются возможное местоположение наноспутника по обратной угловой засечке. На *рисунке 1* показана схема определения местоположения наноспутника, проекция координат которого располагается между эталонными подвижными объектами – ВС.

Информация о координатах ВС представляется диаграммами направленности, в области пересечения (наложения) которых может находиться наноспутник. Для упрощения расчетов форма диаграмм направленности сигналов принята в виде окружностей, описываемых координатами эталонных подвижных объектов, а также радиусом распространения сигнала от датчиков АЗН-В, установленных на ВС, которые в задаче определения местоположения наноспутника являются эталонными координатными объектами. Для определения местоположения наноспутника необходимо выполнить расчет, который позволит выделить замкнутую область нахождения спутника. Эта область понимается как возможная область нахождения наноспутника [6,13,14].

Тем не менее, использование области нахождения наноспутника при помощи пересечения диаграмм направленности, не позволяет с высокой точностью определять его местонахождение. Погрешность расчетов возникает из-за потерь сигнала в гидрометеорах и в свободном пространстве на трассе между ВС и наноспутником. Таким образом, предпочтительным является использование математического аппарата определения местоположения наноспутника, не зависящего от погодно-климатических условий.

**Решение задачи**

Основой математической модели определения местоположения наноспутника при помощи доплеровского сдвига частоты является формула зависимости длины волны от частоты сигнала, где $\lambda=c/f$ (здесь $c$ – скорость света, $f$ – частота испускаемых источником волн).

Если источник приближается к неподвижному наблюдателю со скоростью $v$ относительно среды, то $\lambda=(c-v)/f$. Отсюда частота, которую будет регистрировать неподвижный приемник, равна

$$f_\partial = \frac{f_0}{\left(1-\frac{v_{BC}}{c}\right)} \quad (1)$$

Если же источник, и приемник движутся относительно друг друга, то

$$f_\partial = f_0 \frac{\left(1+\frac{v_{BC}}{c}\right)}{\left(1-\frac{v_{MKA}}{c}\right)} \quad (2)$$

Для определения местоположения наноспутника из формулы доплеровского сдвига частоты (1) выражается скорость движущегося объекта:

$$v_{BC} = c\cdot\left(1-\frac{f_0}{f_\partial}\right) \quad (3)$$

где $f_\partial$ – частота, полученная от доплеровского измерителя частоты.

Для (2) при известной величине скорости ВС скорость наноспутника равна

$$v_{MKA} = c - \frac{f_0\cdot(c+v_{BC})}{f_\partial} \quad (4)$$

Для формул (3), (4) берется интеграл по скорости и определяется расстояние от источника до приемника. Следует заметить, что расстояние будет постоянно изменяться ввиду движения объектов. Для этого считают расстояние от источника до приемника в определенный момент времени

$$S = \int_{t_0}^{t_1} c\cdot\left(1-\frac{f_0}{f_\partial}\right)dt = c\left(1-\frac{f_0}{f_\partial}\right)t\Big|_{t_0}^{t_1} = c\left(1-\frac{f_0}{f_\partial}\right)(t_1-t_0) =$$
$$= \left(c-c\cdot\frac{f_0}{f}\right)(t_1-t_0) = ct_1 - \frac{cf_0}{f}t_1 - ct_0 + \frac{cf_0}{f}t_0 \quad (5)$$

Как итог, расстояние $S$ до подвижного объекта равно

$$S = \int_{t_0}^{t_1} c - \frac{f_0\cdot(c+v_{BC})}{f_\partial}dt = c - \frac{f_0\cdot(c+v_{BC})}{f_\partial}t\Big|_{t_0}^{t_1} = c - \frac{f_0\cdot(c+v_{BC})}{f_\partial}(t_1-t_0)$$
$$c - \frac{f_0\cdot(c+v_{BC})}{f_\partial}(t_1-t_0) = f_\partial\cdot c - f_0\cdot(c+v_{BC})(t_1-t_0) = \quad (6)$$
$$= f_0\cdot c\cdot t_1 - f_0\cdot c\cdot t_0 + f_0\cdot v_{BC}\cdot t_1 - f_0\cdot v_{BC}\cdot t_0 = [m.к.S\cong vt] => S$$

Полученное расстояние для подвижного и неподвижного объектов позволяет применять к ним известные тригонометрические формулы.

Ввиду того, что расстояние от ВС до неподвижного объекта известно, а также известны координаты ВС, становится возможным определить местоположение приемника методом обратной угловой засечки (*рисунок 2*).

Используя формулы Юнга, далее вычисляются координаты неизвестной точки $N$ – $X_N$, $Y_N$

$$x_N = \frac{x_A ctg\beta + x_B ctg\alpha + y_B - y_A}{ctg\alpha + ctg\beta}$$
$$y_N = \frac{y_A ctg\beta + y_B ctg\alpha - x_B + x_A}{ctg\alpha + ctg\beta} \quad (7)$$

Для определения углов $\alpha$ и $\beta$ используется теорема косинусов

$$\cos\gamma = \frac{a^2+b^2-n^2}{2\cdot b\cdot a} \quad (8)$$

Определение местоположения неподвижного приемника накладывает ограничения, связанные с аппроксимацией кривизны поверхности Земли между координатами эталонных объектов.

На *рисунке 3* изображено три эталонных объекта, отмеченные буквами *B, C, D* и приемник *A*. Пунктирными линиями выделены радиус кривизны Земли и разница высот воздушных судов, которые оказывают влияние на точность определения местоположения наноспутника.

Для упрощения выполняемых расчетов берутся идеализированные случаи, когда все воздушные суда находятся относительно друг друга сонаправленно или противоположно направленно.

Пусть при определении местоположения подвижного объектов, ВС и наноспутника находятся в одной и той же местности. В таком случае для определения погрешностей между вычисля-

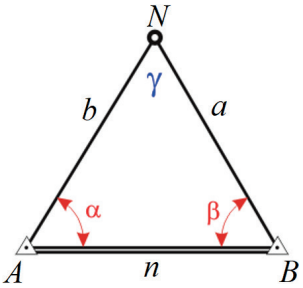
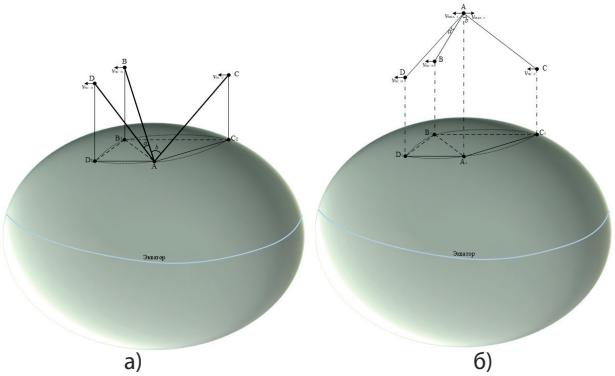



**Рис. 2.** Определение координат точки *N* методом обратной угловой засечки



а) б)

**Рис. 3.** Размещение и пропорции между подвижными эталонными объектами:
а) неподвижная определяемая координата;
б) подвижная определяемая координата

емыми координатами возможно пользоваться моделью, в которой все объекты подвижны.

Для определения расстояния между эталонными точками (ВС) будем использовать известные формулы вычисления расстояния между точками на координатной плоскости

$$\Delta l = \arctan\left(\frac{\sqrt{(\cos\phi_2 \cdot \sin\Delta\lambda)^2 + (\cos\phi_1 \cdot \sin\phi_2 - \sin\phi_1 \cdot \cos\phi_2 \cdot \cos\Delta\lambda)^2}}{\sin\phi_1 \cdot \sin\phi_2 + \cos\phi_1 \cdot \cos\phi_2 \cdot \cos\Delta\lambda}\right) \quad (9)$$

где $\phi_1, \lambda_1; \phi_1, \lambda_2$ – широта и долгота двух ВС соответственно.

Для вычисления местоположения наноспутника будем использовать формулы определения местоположения при помощи доплеровского сдвига частоты – (6)-(8), формулу определения расстояния между эталонными точками (9).

**Обсуждение полученных результатов**

Определение местоположения наноспутника выполняется, предположив, что наноспутника и ВС передвигаются с различными скоростями.

Для точности эксперимента, состоящего из серии измерений в момент полета ВС необходимо знать математическую модель изменения доплеровского смещения частоты. Как ограничение, позволяющее получить корректный результат, были произведены вычисления по точкам местности, примерно одинаково удаленных друг от друга на одном и том же доплеровском смещении частоты, с условием, что через 24 часа спутник пройдет над той же местностью и ВС будут находиться в том же положении.

В *таблице 1* представлены исходные данные, получаемые с воздушных судов для расчета местоположения наноспутника, где $H_{BC}$ – высота ВС над поверхностью моря, $V_{BC}$ – скорость ВС, $R$ – радиус зоны покрытия передатчиком АЗН-В (зависит от типа ВС).

В результате проведенных расчетов в *таблице 2* получены местоположения наноспутника, определенные при помощи доплеровского сдвига частоты и область нахождения наноспутника.

Промежуточные расчетные значения определения геометрической дальности прямой видимости представлены в *таблице 3* (выборочно).

В *таблице 3* определена мера разброса значений величины относительно ее математического ожидания. Следует заметить, что определение местоположения наноспутников происходило по 2-м эталонным объектам, используемым для вычисления координат наноспутника.

Определения координат наноспутника возможно другим отличным от предлагаемого способа методом. Определение местоположения Малых космических аппаратов разностно-дальномерным методом предполагает использование минимум 3-х сигналов источника радиоизлучения (ИРИ). Определение координат в данном методе основано на измерении разности дальностей от ИРИ до нескольких МКА. Для определения разности дальностей необходимо измерить временные задержки между моментами прихода сигналов одного ИРИ к МКА [2].

Основными недостатками разностно-дальномерного метода являются значения точности определения координат МКА, зависящие от количества пунктов наблюдения и высоты орбиты

**Таблица 1**

Данные, получаемые для расчета местоположения наноспутника, находящегося над территорией РФ

| № п/п | $H_{BC1}$ (км) | $H_{BC2}$ (км) | $V_{BC1}$ (км/ч) | $V_{BC2}$ (км/ч) | $R_{BC1}$ (км) | $R_{BC2}$ (км) | Координаты городов, над которыми находятся ВС | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | $(X;Y)_{BC1}$ | $(X;Y)_{BC2}$ | $BC_1$-$BC_2$ |
| 1 | 8,3 | 9,2 | 851 | 820 | 250 | 200 | | | |
| 2 | 8,2 | 9,0 | 853 | 830 | 250 | 200 | | | |
| 3 | 8,1 | 9,6 | 856 | 834 | 200 | 200 | 54,04; 48,18 | 54,31;47,63 | с.Никольско-Черемашки – с.Тайга |
| 4 | 8,6 | 6,2 | 800 | 844 | 220 | 200 | 53.15; 47.8 | 54.88; 47.52 | с. Игнатовка – с. Шемурша |
| 5 | 7,3 | 7,2 | 860 | 855 | 230 | 200 | 54.1; 47.6 | 53.1; 47.7 | пгт.Майна - пгт. Новосспасское |
| 6 | 6,3 | 8,2 | 870 | 846 | 230 | 220 | 54.2; 50.4 | 54.3; 48.3 | с.Кошки- г.Ульяновск |
| 7 | 8,0 | 7,2 | 853 | 842 | 220 | 230 | 53.2; 50.1 | 54.2; 49.6 | г.Самара - г.Дмитровград |

**Таблица 2**

Расстояние между ВС

| № п/п | Нахождение ВС | Расчетные |
|---|---|---|
| 1 | г.Ульяновск - г.Дмитровград | 75,86 |
| 2 | пгт. Новосспасское - г.Тольятти | 130,5 |
| 3 | с. Кошки- г.Ульяновск | 131,7 |
| 4 | Сатильо - Энтронке Сан Роберто | 107,9 |

**Таблица 3**

Расчетные данные местоположения наноспутника, находящихся над РФ
(получены при помощи доплеровского сдвига частоты)

| № п/п | Нахождение ВС | $(X;Y)_{наноспутника}$ рассчитанные по доплеровскому сдвигу частоты | | | | Дисперсия | СКО | Размах, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 1 | пгт. Суходол – пгт. Аскубаево | 53,9; 51,8 | 53,85; 51,88 | 53,9; 51,75 | 53,87; 51,82 | 0,006; 0,003 | 0.025; 0,053 | 7,3 |
| 2 | Пгт. Майна – г. Будинск | 54,75; 48,23 | 54,75; 48,22 | 54,76; 48,24 | 54,77; 48,23 | 0,00009; 0,00009 | 0,009; 0,009 | 6,3 |
| 3 | С. Никольско-Черемшане – | 53,68; 48,49 | 53,67; 48,47 | 53,69; 48,49 | 53,67; 48,47 | 0,00009; 0,00013 | 0,009; 0,01 | 5,3 |
| 4 | С. Игнатовка-с. Шемурша | 53,9; 48,2 | 53,8; 48,3 | 53,7; 48,2 | 53,9; 48,2 | 0,0092; 0,0025 | 0,09; 0,05 | 3,7 |
| 5 | пгт. Майна - пгт. Новосспасское | 53,6; 47,3 | 53,4; 47,5 | 53,6; 47,5 | 53,7; 47,4 | 0,01; 0,01 | 0,12; 0,09 | 6,5 |
| 6 | с. Кошки- г. Ульяновск | 53,6; 47,3 | 53,4; 47,4 | 53,5; 47,5 | 53,4; 47,5 | 0,01; 0,01 | 0,09 | 3,7 |
| 7 | г. Самара – г. Дмитровград | 53,1; 50,5 | 53,2; 50,4 | 53,2; 50,3 | 53; 50,6 | 0,01; 0,01 | 0,09 | 3,9 |

спутникового аппарата. Причем следует заметить, что от количества пунктов наблюдения зависит определение координат МКА в пространстве и на местности (необходимо не менее 3-х точек излучения). В разностно-дальномерном методе от высоты орбиты МКА зависит точность определения базы координат. Причем следует заметить, что в разностно-дальномерном методе используется специальная система сигналов предназначенных для расчета координат. Чего нельзя сказать о методе, предлагаемом в представленной математической модели выше.

При использовании сигналов (сообщений) АЗН-В (ADS-B) на основании математической модели статьи становится возможным определить координату наноспутника с дисперсией равной ($9 \cdot 10^{-5}$; $9 \cdot 10^{-5}$). Таким образом, точность метода определения координат зависит от количества эталонных точек находящихся в поле радиовидимости наноспутника, СКО может достигать значений (0,009; 0,01).

Следует заметить, что предлагаемая математическая модель в статье нахождения местоположения наноспутника является актуальным в вопросе использования его при уточнении местоположения наноспутника (используются сигналы, не предназначенные для определения местоположения). Данное утверждение основывается на величине дисперсии, рассчитанной для серии вычислений, выполненных в одной той же местности за определенный промежуток времени, которая показывает точность нахождения местоположения, по формуле доплеровского смещения частоты.

**Выводы**

1. Разработана математическая модель определения местоположения наноспутника на основе физического эффекта Доплера, отличающаяся тем, что эталонные объекты и объект с неизвестными координатами являются подвижными. Учет взаимного движения объектов реализован при помощи физических законов распространения сигнала в свободном пространстве и атмосфере Земли, основывающийся на эффекте Доплера. Эффект Доплера позволяет производить измерения расстояния от определяемого объекта до эталонных точек без учета направления ВС, в виду того, что направление ВС не оказывает влияния на точность измерения расстояния. С учетом масштабов расстояний между объектами в модели учтены взаимная подвижность объектов и искажения при аппроксимации нелинейности земной поверхности, что позволяет получать расчетное местоположения с необходимой точностью. Показано, что применение данной модели оправдано в случаях сонаправленного или противоположно направленного движения эталонных объектов и наноспутника.

2. Моделирование и расчеты показали, что статистическая обработка смещений координат относительно построенной области при повторных измерениях на следующих витках движения наноспутника подтверждает достижение необходимой точности расчетов. Дисперсия, вычисленная для серии измерений местоположения наноспутника, показывает значительную точность определения координат, методом доплеровского смещения частоты.

3. Предлагаемая математическая модель может вычислить не только местонахождение наноспутника, но и уточнить его траекторию, что является дополнительной информацией о движении аппарата и позволяет формировать базу знаний [15]. Данное обстоятельство позволяет на основании предлагаемой математической модели применять методы и средства автоматического слежения за малым космическим аппаратом, не используя при этом кеплеровские данные орбиты спутника, получаемые от радиолокационных станций.

**Литература**

1. Атакищев О.И., Шиленков Е.А., Фролов С.Н., Титенко Е.А., Щитов А.Н., Зарубин Д.М. Автономная интеллектуальная группировка малых космических аппаратов – космический эксперимент «РадиоСкаф-5»// Известия Института инженерной физики, 2020. №1(55). С.42-48.
2. Ворошилин Е.П., Миронов М.В., Громов В.А. Определение координат источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов// Доклады ТУСУРа, 2010. №1(21). Ч.2. С.23-28.
3. Артемьев О.Г., Самбуров С.Н., Шиленков Е.А., Фролов С.Н., Щитов А.Н. Результаты автономного космического полета интеллектуальной группировки МКА в рамках космического эксперимента «РадиоСкаф»// Радио, 2020. №4(163) С.25-34.
4. Zoltan Katona, Michael Gräßlin, Anton Donner, Norman Kranich, Hartmut Brandt, Hermann Bischl, Martin Brück A flexible LEO satellite modem with Kaband RF frontend for a data relay satellite system // International Journal of Satellite Communications and Networking, Volume 38, Issue 3, January 2020. Pp.301-313.
5. Freire Carrera F., Shilenkov E., Titenko E., Frolov S., Shitov A. Mathematical model of the earth's magnetic anomalies // Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia, 2020. Т.43. №S1. Pp.35-39.
6. Frolov S., Chadrina O., Titenko E., Shitov A., Andrey Kh., Dmitry T., Andrey G. Development of a method to determine the location of a nanosatelite using ADS-B // Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria Universidad del Zulia. 2020. Т. 43. № S1. Pp.48-55.
7. Guoqiang Cheng Qingquan Huang Ruiyang Xing Min Lin Prabhat K. Upadhyay On the secrecy performance of integrated satellite aerial terrestrial networks// International Journal of Satellite Communications and Networking, Volume 38, Issue 3, January 2020. Pp.314-327.
8. Кузнецов В.И., Данилова Т.В., Архипова М.А. Автоматизированная система научных исследований и разработка в ее среде методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов// Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли, 2019. Т.10. №1. С.32-46.
9. Симонов П.И., Кубанков Ю.А. Методика декодирования сообщений ADS-B как часть проверки качества бортовых систем воздушного судна в составе автоматизированных измерительных стендов, построенных в среде графического языка программирования LabVIEW// Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли, 2018. Т.10. №2. С.13-24.
10. Xiaopo Wu, Nian Fang, Yangming Shi, Yifeng Fu, Kai Xie Target recognition for satellite communication by employing higher order statistics// International Journal of Satellite Communications and Networking, Volume 38, Issue 5, August 2020. С 15-27.
11. Feng Zhu, Teer Ba, Yuan Zhang, Xiqi Gao, Jiang Wang Terminal location method with NLOS exclusion based on unsupervised learning in 5G LEO satellite communication systems// International Journal of Satellite Communications and Networking, Volume 38, Issue 5. March 2020. С.425-436.
12. Титенко Е.А., Фролов С.Н., Шиленков Е.А., Щитов А.Н., Добросердов Д.Г., Зарубин Д.М., Горбунов А.А., Ханис А.Л. Подход к нахождению наиболее вероятной области определения подвижного объекта на основании идеализированных сигналов// IV Всероссийская научно-практическая конференция «Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения», 2020. С.42-56
13. Захаренков А.И., Тетерин Д.П., Добросердов О.Г., Титенко Е.А., Фролов С.Н., Щитов А.Н., Передельский Г.И. Модель и алгоритм расчета координат летательного аппарата на основе датчиков местоположения// Труды Юго-Западного государственного университета. Серия: менеджмент, вычислительная техника, информатика. Медицинское оборудование, 2008. №.4. С.163-180.
14. Титенко Е.А., Фролов С.Н., Щитов А.Н., Щитова А.Н., Математическая модель определения местоположения наноспутника формата CubeSat// Сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения. 17 апреля 2020 г. С.354-360.
15. Титенко Е.А., Петрик Е.А., Воронин Д.А., Атакищева И.В. Продукционная модель для параллельной обработки знаний// Информационно-измерительные и управляющие системы, 2011. Т.9. №11. С.81-86.

УДК 676.001.57:628.179–935.4

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

# MATHEMATICAL MODEL OF HEAT ENERGY ACCUMULATION PROCESS

Геннадий Семенович Бут
*кандидат технических наук*
доцент
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (919) 994-60-98
E-mail: 9199946098@mail.ru

Сергей Витальевич Синицын
*кандидат технических наук*
доцент
филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (916) 868-85-69
E-mail: sinitsinsv@rambler.ru

**Аннотация**
На основании закона сохранения энергии разработана математическая модель процесса аккумулирования тепловой энергии в системах оборотного водоснабжения. Модель процесса получена в виде интегро-дифференциального уравнения. Рассмотрены два режима процесса аккумулирования тепла: неустановившийся и равновесный. Определены переменные величины, используя которые можно управлять процессом стабилизации температуры водной системы. Установлено, что процесс накопления тепловой энергии всегда постепенно выходит на равновесный режим.
**Ключевые слова:** математическая модель, аккумулирование тепловой энергии, системы оборотного водоснабжения.

**Summary**
The law of conservation of energy permits developing a mathematical model for the process of heat energy accumulation in circulating water supply system. The model of the process in obtained as an integro-differential equation. Two conditions of the heat accumulation process are considered: unsteady and equilibrium. Variable values are determined whose application allows the process of the water system temperature stabilization to be controlled. It is established that the process of heat energy accumulation always gradually goes into equilibrium conditions.
**Keywords:** mathematical model, heat energy accumulation, process, circulating water supply systems.

Наряду с сокращением потребления свежей воды, повторное использование оборотной и очищенной воды способствует аккумулированию низкопотенциальной энергии в технологической и водной системах. Это приводит к экономии потребления тепловой энергии и рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов.

Используя метод расчета низкопотенциального тепла на основе потоков воды и композиционных материалов и метод определения аккумулированного тепла отдельными блоками водной системы предприятия ранее [1] проведены расчеты накопления тепловой энергии в замкнутой системе водопользования современного картонно-бумажного комбината.

Учитывая современное состояние вопросов в области управления процессом аккумулирования тепловой энергии в системах оборотного водоснабжения, в соответствии с методологией системного анализа [2], необходимо разработать математические модели данного процесса, которые позволили бы на их основе принимать решения по оптимальному управлению потоками тепловой энергии.

Укрупненная схема системы водоснабжения современного предприятия состоит из двух подсистем и двух элементов системы (*рисунок 1*). В подсистеме производства (П) и подсистеме очистных сооружений (ПОС) происходят процессы изменения величины энергии аккумулированной в водной системе, т. е. данные две подсистемы оказывают непосредственно активное воздействие на процесс накопления тепла в системе оборотного водоснабжения предприятия. Входной смеситель (С) и выходной распределитель (Р) относятся к пассивным элементам системы. По отношению потокам тепловой энергии

они выполняют функции, соответствующие техническим устройствам по смешению и распределению материального потока.

Как и любая замкнутая система, рассматриваемая система водоснабжения имеет вход и выход, через который она соединена с окружающей средой. Положив равным нулю поток тепловой энергии, поступающей на вход и выход системы, можно рассмотреть и проанализировать распределение тепловой энергии, аккумулированной в системе оборотного водоснабжения.

Один из подходов по расчету накопления в системе оборотного водоснабжения, растворенного в воде минерального вещества при однокомпонентном потоке изложен в [3]. Поток тепловой энергии, циркулирующей в системе оборотного водоснабжения, также можно рассматривать как однокомпонентный элемент сложной материальной системы. Для описания процесса аккумулирования тепловой энергии в водной системе подсистемы производства введем понятие теплопроизводительности – количество тепла, выделяемого в водную систему теплогенерирующем оборудованием данной подсистемы за единицу времени ($\eta$). Причем теплопроизводительность принимаем известной интегрируемой функцией времени. Такую зависимость можно получить, например, используя статистические данные о потреблении тепловой энергии теплогенерирующими устройствами подсистемы производства в зависимости от сезона года.

Если выразить на входе системы и на выходе ПОС (см. *рисунок 1*) потоки тепловой энергии соответственно через $\dot{q}_{вх}$ и $\dot{q}_4$ (точка над символом здесь и далее обозначает производную по времени), то выходной тепловой поток из смесителя (С) будет равен

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_4 + \dot{q}_{вх} \quad (1)$$

Блок распределителя разделяет выходящий из производства поток на два, один из которых поступает в ПОС, а другой выходит из системы. Поток тепла, поступающий в ПОС (см. *рисунок 1*), запишется

$$\dot{q}_3 = K * \dot{q}_2 \quad (2)$$

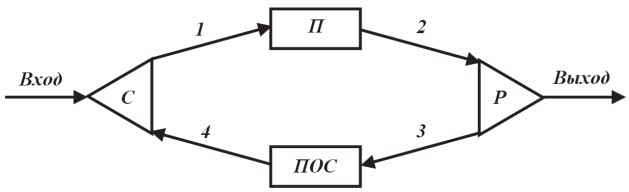



**Рис.1.** Укрупненная схема системы водоснабжения современного предприятия: С – входной смеситель; П – подсистема производства; Р – выходной распределитель; ПОС – подсистема очистных сооружений

где $K$ – коэффициент разделения потоков. Тепловой же поток на выходе из системы

$$\dot{q}_{вых} = \dot{q}_2 - \dot{q}_3 = \dot{q}_2 - K\dot{q}_2 = (1-K)\dot{q}_2 \quad (3)$$

В реальных условиях в подсистеме производства суммируются все тепловые потоки, поступающие в производство (потоки воды, пара и т.д.). Часть тепловой энергии здесь будет безвозвратно теряться (внутренние потери энергии в подсистеме в единицу времени). Для характеристики этих потерь введем коэффициент тепловых потерь в подсистеме производства – $\gamma$. Тогда тепловой поток на выходе из подсистемы П определяется

$$\dot{q}_2 = (1-\gamma)\sum_{i=1}^{n} q_i \quad (4)$$

где $q_i$ – i-й тепловой поток, поступающий в подсистему П;

$n$ – количество тепловых потоков.

Выразим коэффициент тепловых потерь в ПОС через тепловые потоки на ее входе и выходе как

$$\alpha = \frac{\dot{q}_4}{\dot{q}_3} \quad (5)$$

откуда видно, что чем большее значение имеет коэффициент $\alpha$, тем тепловые потери в ПОС меньше. Отсюда следует один из способов управления процессом аккумулирования, а также утилизации тепловой энергии. Для этого, используя значения коэффициента $\alpha$ в качестве управляющего оператора, можно воздействовать на выходной поток тепла, поступающий после ПОС в производство. При превышении коэффициентом $\alpha$ заданного значения $\alpha_1 (\alpha > \alpha_1)$ необходимо принимать дополнительные меры по охлаждению определенного объема воды, поступающей в производство.

Объем воды, который необходимо подвергнуть охлаждению, и объем воды, не требующий дополнительного охлаждения, определяются с помощью коэффициента разделения потоков К. На *рисунке 2* изображены два варианта укрупненной схемы системы оборотного водоснабжения с регулированием аккумулированной тепловой энергией. Первый вариант отличается тем, что после первого распределителя Р1 часть оборотной воды после ПОС направляется на смеситель. Во втором же варианте часть оборотной воды после Р1 поступает прямо в подсистему производства.

Учитывая закон сохранения энергии, поток тепловой энергии в любой точке технологической цепи по расходу воды и потоку тепловой энергии запишется

$$\dot{q} = \frac{\partial V}{\partial t} * \frac{\partial q}{\partial V} = Q * R = Q * T * \rho * C \quad (6)$$

где $V$ – объем воды в некоторой точке технологической цепи;

$q$ – поток тепловой энергии, проходящей через данную точку;
$Q$ – расход воды;
$R$ – плотность теплового потока (количество тепловой энергии, приходящейся на единицу объема воды, проходящей через данную точку);
$T$ – температура воды;
ρ, $C$ – плотность и удельная теплоемкость воды.

Считая, что для воды ρ, $C = const$, получим

$$\dot{q} = Q * T \quad (7)$$

Рассмотрим систему оборотного водоснабжения в неустановившемся режиме аккумулирования тепловой энергии (см. *рисунок 1*). Не учитывая внутреннюю структуру подсистем и полагая, что на вход системы поступает поток тепловой энергии $\dot{q}_{вх}$, а от системы производства $\eta$ и потери тепла соответственно составляет в подсистеме очистных сооружений и за счет выхода части теплового потока из системы $\dot{q}_{пос}$ и $\dot{q}_{вых}$, скорость изменения тепловой энергии в системе запишется

$$\dot{q} = (\dot{q}_{вх} + \eta)(1-\gamma) - \dot{q}_{вых} - \dot{q}_{пос} \quad (8)$$

Уравнение (8) – дифференциальная запись закона сохранения энергии и теплового баланса для рассматриваемой системы. При рассмотрении же внутренней структуры всей системы водоснабжения необходимо ввести понятие криволинейной координаты $l$ любой точки на схеме ($l$ – расстояние, измеряемое вдоль схемы от некоторой фиксированной точки). Температура $T$ и сечение $S$ любого элемента схемы – функции координат этих элементов. Вся же тепловая энергия, аккумулированная в водной системе, будет определяться криволинейным интегралом по всему контуру рассматриваемой схемы оборотного водоснабжения

$$q = \rho * C \oint_l T_l * S_l * dl \quad (9)$$

Дифференцируя (9) по времени и учитывая, что ρ,$C$=$const$, получим

$$\dot{q} = \oint_l T_l * S_l * dl \quad (10)$$

Подставив (10) в (8), получим

$$(\dot{q}_{вх} + \eta)(1-\gamma) - \dot{q}_{вых} - \dot{q}_{пос} = \oint_l T_l * S_l * dl \quad (11)$$

Величина $\dot{q}_{пос}$ – ни что иное, как скорость потери тепловой энергии в подсистеме очистных сооружений. Скорость потери тепловой энергии в ПОС, исходя из *рисунка 1*, будет иметь вид

$$\dot{q}_3 - \dot{q}_4 = \dot{q}_{пос} \quad (12)$$

В то же время по определению ПОС

$$\dot{q}_4 = \alpha * \dot{q}_3 \quad (13)$$

После подстановки (13) в (12)

$$\dot{q}_3(1-\alpha) = \dot{q}_{пос} \quad (14)$$

Из (14), используя (13)

$$\dot{q}_{пос} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)\dot{q}_4 \quad (15)$$

Используя (7)

$$\dot{q}_{пос} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)T_4 Q_4 \quad (16)$$

Элемент системы Р, по определению, производит распределение потока тепловой энергии, поступающей из подсистемы П, тогда (см. *рисунок 1*)

$$\dot{q}_3 = K * \dot{q}_2 \quad (17)$$

Подставляя (17) в (14)

$$K\dot{q}_2(1-\alpha) = \dot{q}_{пос} \quad (18)$$

Перепишем уравнение (11), используя (18),

$$(\dot{q}_{вх} + \eta)(1-\gamma) - \dot{q}_{вых} - K\dot{q}_2(1-\alpha) = \oint_l T_l * S_l * dl \quad (19)$$

Исходя из (7), перепишем (19)

$$(Q_{вх} * T_{вх} + \eta)(1-\gamma) - Q_{вых} * T_{вых} - K(1-\alpha)T_2 Q_2 = \oint_l T_l * S_l * dl \quad (20)$$

Рассмотрим модель системы оборотного водоснабжения с замкнутым циклом, т.е. $Q_{вых}$=$0$, тогда

$$(Q_{вх} * T_{вх} + \eta)(1-\gamma) - K(1-\alpha)T_2 Q_2 = \oint_l T_l * S_l * dl \quad (21)$$

Из (21) температура воды в системе оборотного водоснабжения будет равна

$$T_2 = \frac{(Q_{вх} * T_{вх} + \eta)(1-\gamma) - \oint_l T_l * S_l * dl}{Q_2 * K(1-\alpha)} \quad (22)$$

Выражение (22) дает полное описание процесса аккумулирования тепловой энергии в системе оборотного водоснабжения.

Все элементы системы водоснабжения всегда можно представить в виде отрезков одного сечения. Тогда правая часть уравнения (21) заменится суммой по таким отрезкам

$$(Q_{вх} * T_{вх} + \eta)(1-\gamma) - K(1-\alpha)T_2 Q_2 = \sum_l TV \quad (23)$$

Если рассмотреть реальные условия протекания тепловых процессов в системе, то все элементы, за исключением подсистем производства и очистных сооружений, являются пассивными. Из этого следует вывод, что скорость изменения

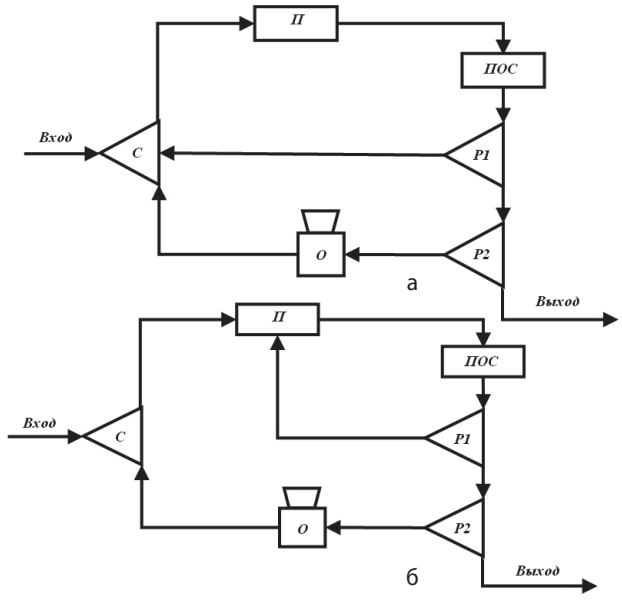



**Рис.2.** Первый (а) и второй (б) варианты укрупненной схемы системы оборотного водоснабжения с регулированием тепловой энергии (Р1 и Р2 – распределители; О – устройство дополнительного охлаждения)

температуры не зависит от места ее измерения на протяжении всей длины пассивного элемента. Исходя из этого, правые части в выражениях (21) и (23) будут равны $TW$, где $W$ – водоемкость всей системы оборотного водоснабжения, а уравнение (23) принимает вид

$$(Q_{вх}T_{вх} + \eta)(1-\gamma) - \beta T_2 Q_2 = TW \quad (24)$$

Откуда температура в системе будет равна

$$T_2 = \frac{(Q_{вх}T_{вх}+\eta)(1-\gamma)-TW}{\beta Q_2} \quad (25)$$

где $\beta=K(1-\alpha)$.

Общий вариант модели (22), а также ее частные случаи (23) и (25) дают возможность прогнозировать температуру водной системы предприятия во времени, т.е. температура в системе $T_2$ будет являться функцией времени. Из этого следует, что все приведенные модели описывают неустановившийся режим аккумулирования тепла в системе. В моделях (22), (23) и (25) величины $Q_{вх}$, $T_{вх}$, $\eta$ и $\beta$ являются причинными, т.е. они непосредственным образом влияют на температуру воды в системе $T_2$, значение которой является следствием изменения причинных величин, которые можно использовать в качестве главных сигналов для управления процессом аккумулирования тепловой энергии.

Управляющие воздействия для отдельных подсистем системы оборотного водоснабжения (см. *рисунок 1*) будут иметь вид

для подсистемы П

$$X_{01}(t) = Q_{вх} + \eta \quad (26)$$

для подсистемы ПОС

$$X_{02}(t) = -\beta \quad (27)$$

Для системы управляющий сигнал

$$X_0(t) = Q_{вх} + \eta - \beta \quad (28)$$

Следует отметить, что величины $T_{вх}$, $\gamma$, хотя и являются причинными по отношению к $T_2$, но их нельзя использовать в качестве управляющих сигналов, так как регулировать температуру внешнего источника и величину тепловых потерь в подсистеме производства не представляется возможным.

Исходя из полученного уравнения входного сигнала (28), воздействующего на систему, следуют варианты управления процессом аккумулирования и утилизации низкопотенциальной тепловой энергии в водной системе предприятия.

1. Изменением расхода $Q_{вх}$ свежей воды от $Q_{вхmin}$ до $Q_{вхmax}$ для картонно-бумажных предприятий в среднем соответствует 50-60 м$^3$ на 1 т готовой продукции. При оборотном водоснабжении $Q_{вхmin}$ равно 7-8 м$^3$/т. $T_{вх}$, – температура свежей воды, которая является практически неизменной величиной для небольшого промежутка времени (день, неделя). Но $T_{вх}$, следует учитывать при сезонном управлении работой системы. Поэтому наряду с текущим регулированием процесса аккумулирования тепловой энергии необходимо предусмотреть решение вопросов сезонного управления.

2. Для целей управления можно использовать коэффициенты $K$ и $\alpha$, входящие в $\beta$. Коэффициент $K$ – коэффициент распределителя Р. Он показывает, какая часть использованной в производстве воды (см. *рисунок 1*) поступает в цикл оборотного водоснабжения для системы с частичным замыканием цикла водоснабжения. Для систем с полным использованием воды после подсистемы производства (см. *рисунок 2*) коэффициент $K$ будет учитывать влияние на потоки воды распределителей Р1 и Р2 (соответственно с коэффициентами распределения $K_{p1}$ и $K_{p2}$). Символ $\alpha$ – коэффициент тепловых потерь в ПОС. Чем меньше коэффициент $\alpha$, тем больше тепловые потери в ПОС. Размещая в ПОС устройства дополнительного охлаждения (например, вентиляторные градирни) можно включением и выключением определенного числа ее секций регулировать в необходимых пределах значение коэффициента $\alpha$.

3. В качестве управляющего воздействия в процессе аккумулирования тепловой энергии может быть использована величина теплопроизводительности $\eta$. Она постоянна для одних и тех же видов продукции при неизменном составе элементов подсистемы и изменяется (например, в целлюлозно-бумажной промышленности при производстве бумаги, картона) от вида, марки продукции, а также от сезона. Поэтому изменение величины $\eta$ следует учитывать при сезонном управлении, а также при выпуске различных видов продукции. Задача будет состоять в выборе оптимальных значений $\eta$, $K$, $\alpha$, $Q_{вх}$ таким образом, чтобы температура в системе поддерживалась на определенном уровне.

Система будет находиться в равновесном режиме аккумулирования тепла при условии постоянной температуры воды во всех точках контура пассивного элемента водной системы в любой, наперед заданный промежуток времени. Такой случай будет выполняться при условии $\dot{T}_l = 0$. Тогда модель (22) будет иметь вид

$$T_2 = \frac{(Q_{вх}*T_{вх}+\eta)(1-\gamma)}{\beta Q_2} \quad (29)$$

т.е. при равновесном режиме аккумулирования тепловой энергии в обобщенной модели системы и частных ее вариантах правые части равны нулю. Тогда из (8) имеем

$$(\dot{q}_{вх} + \eta)(1-\gamma) = \dot{q}_{вых} + \dot{q}_{пос} \quad (30)$$

Отсюда следует, что равновесный режим в

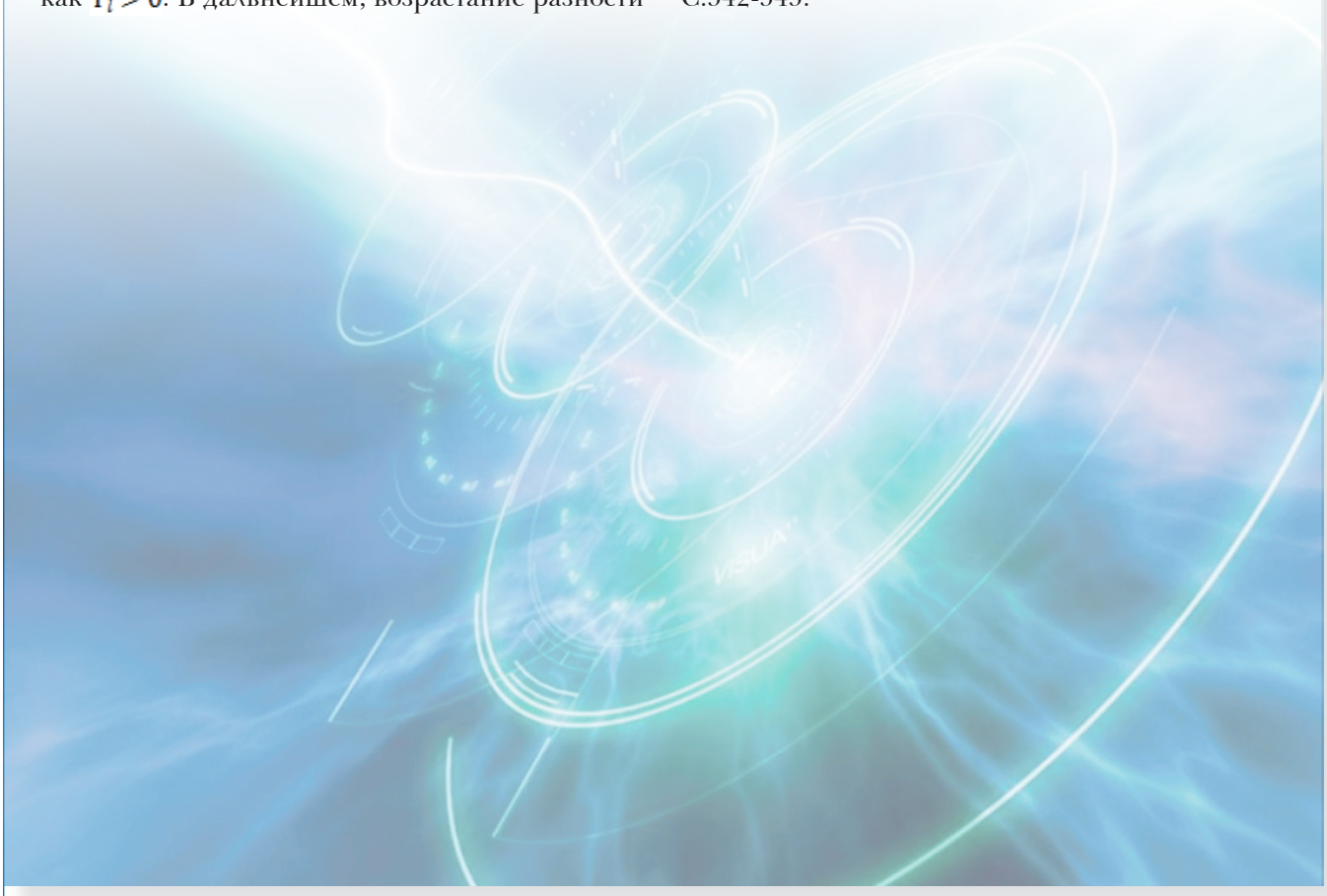
системе наступает при балансе внесенной тепловой энергии и удаляемой из системы.

Производственные расчеты по математической модели хорошо согласуются с реальными данными. Так, при определении времени выхода системы водоснабжения с параметрами $W$=5040 м$^3$, $T_{вх}$=24ºС, $T_2$=44,4ºС, $Q_2$=312 м$^3$/ч при $\beta$=1, $\gamma$=0,1 и точности определения времени $\xi$=1 на равновесный режим аккумулирования тепловой энергии (используя соответствующим образом преобразованное выражение 25) время равно 48,5 ч. В реальных условиях оно равно 50 ч (погрешность составляет 3%). При расчете же температуры водной системы в равновесном режиме аккумулирования тепла для различных предприятий по (29) погрешность предсказания температуры не превышала 5%. Поэтому в практической работе при предварительных расчетах аккумулированной тепловой энергии в водной системе проектируемых предприятий можно пользоваться выражением (29).

В заключение необходимо отметить, что при постоянных значениях входных параметров $T_{вх}$=const и $Q_2$=const скорость изменения температуры в системе будет определяться разностью $X_{01}$-$X_{02}$. В начальный промежуток времени (например, при пуске после остановки картоноделательной машины) эта разность будет >0, так как $\dot{T}_l > 0$. В дальнейшем, возрастание разности в (25) увеличит и $T_2$. Таким образом, постепенно разность $X_{01}$-$X_{02}$, при постоянном, например, $X_{01}$ начнет уменьшаться и будет стремиться к нулю. Выражение $X_{01}$-$X_{02}$→0 определяет процесс, который стремится к равновесному режиму работы. Отсюда следует вывод, что с увеличением скорости введения тепловой энергии в водную систему соответственно увеличивается и скорость ее выведения в ПОС и процесс аккумулирования тепловой энергии всегда постепенно выходит на равновесный режим работы. Такое свойство системы оборотного водоснабжения применительно только к накоплению растворенных в воде веществ отмечено в [3]. С физической точки зрения оно распространяется на процесс аккумулирования тепловой энергии, что подтверждается теоретическими и практическими расчетами.

**Литература**

1. Кафаров В.В. Принципы создания безотходных химических производств. М.: Химия, 1982. 288 с.
2. Иванов Вл.Вас. Иванов Вл.Вл. Математическая модель системы водооборота// Химия и технология воды, 1983. №2. С.110-113.
3. Крунчак В.Г., Крунчак М.М., Максименко Ю.Л., Яковлев С.В. Способ расчета систем очистки и многократного использования сточных вод// Химия и технология воды, 1981. №6. С.542-545.



УДК 004.032

# МЕТОД И АЛГОРИТМ СРЕДНЕВЗВЕШЕННОГО НЕЧЕТКОГО РАНЖИРОВАНИЯ И КЛАСТЕРИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

# METHOD AND ALGORITHM FOR WEIGHTED AVERAGE FUZZY RANKING AND CLUSTERING OF INNOVATIVE PROJECTS

Татьяна Викторовна Абрамова
старший преподаватель кафедры
«Прикладной математики и информатики»
Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова
Адрес: 455023, Челябинская обл., г.
Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Тел.: 8 (800) 100-19-34
E-mail: tanusha-atv@mail.ru

Ирина Александровна Буйневич
аспирант кафедры
информационных систем и технологий
Юго-Западный государственный университет
начальник отдела
инфотелекоммуникационных технологий
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: ira.buynevich@yandex.ru

Евгений Анатольевич Титенко
*кандидат технических наук, доцент*
доцент кафедры
«Информационных систем и технологий»
Юго-Западный государственный
университет
Адрес: 305040, г. Курск, ул.
50 лет Октября, д. 94
Тел.: 8 (471) 251-50-24
E-mail: johntit@mail.ru

Юрий Алексеевич Халин
*кандидат технических наук, доцент*
доцент кафедры
«Информационных систем и технологий»
Юго-Западный государственный
университет
Адрес: 305040, г. Курск, ул.
50 лет Октября, д. 94
Тел.: 8 (471) 251-50-24
E-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Аннотация**

Отсутствие единого представления о количественных показателях, оценивающих экономическую составляющую инновационных проектов, обуславливает необходимость разработки единого подхода, позволяющего лицу, принимающему решение, определить экономическую эффективность инвестиционных проектов. Предложенный в статье метод основан на положениях общей теории выбора и теории нечетких множеств – метод и алгоритм средневзвешенного нечеткого ранжирования и кластеризации инновационных проектов.

**Ключевые слова:** инвестиционный проект, нечеткое множество, нечетко-статистическая обработка характеристик, нечеткое расстояние, кластер, коэффициент вариации, поправочный коэффициент, массив.

**Summary**

There is a need to develop a unified approach for determining the economic efficiency of investment projects due to the lack of a unified view of quantitative indicators that provide an economic assessment of innovative projects. The method proposed in the article is based on the provisions of the General theory of choice and the theory of fuzzy sets – the method and algorithm for weighted average fuzzy ranking and clustering of innovative projects.

**Keywords:** investment project, fuzzy set, fuzzy statistical processing of characteristics, fuzzy distance, cluster, coefficient of variation, correction coefficient, array.

## Введение

В настоящее время перед большинством крупных инвесторов стоит актуальная управленческая задача выбора наилучшего инновационного проекта. В отличие от задачи формирования инвестиционного портфеля, она предполагает выбор только лишь одного проекта. На данный момент в управленческой науке нет единого мнения относительного интегрального показателя, оценивающего инновационный проект.

Данная задача усложняется тем, что для большинства частных показателей, описывающих проект практически невозможно полу-

чение объективных количественных оценок. Также необходим учет весовых коэффициентов данных показателей. В связи с этим возникает актуальная научная задача, заключающаяся в разработке метода и алгоритма выбора и ранжирования инновационных проектов с учетом весов частных показателей. Предложенный метод основывается на положениях общей теории выбора и теории нечетких множеств.

**Постановка задачи**

Пусть имеется $m$ инновационных проектов (ИНП), описываемых векторами нечетких переменных:

$$\begin{aligned} InP_1 &= \{ y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{14}, y_{15} \} \\ InP_2 &= \{ y_{21}, y_{12}, y_{23}, y_{24}, y_{25} \} \\ &\dots \\ InP_m &= \{ y_{m1}, y_{m2}, y_{1m}, y_{m4}, y_{m5} \} \end{aligned} \quad (1)$$

где $y_{t1}$ – нечеткая переменная уровня новизны;
$y_{t2}$ – нечеткая переменная уровня трудоемкости;
$y_{t3}$ – нечеткая переменная уровня коммерциализации;
$y_{t4}$ – нечеткая переменная квалификационно-организационного уровня;
$y_{t5}$ – нечеткая переменная научно-технического уровня;
$t=1\text{-}m$.

Традиционно ранжирование ИНП и как следствие выбор наилучшей альтернативы среди рассматриваемых проектов выполняется на основе нечеткого логического вывода (с помощью правил ЕСЛИ…ТО) и вычислением единой интегральной характеристики, вобравшей в себя значения всех переменных из векторов (1). Полученная выходная нечеткая переменная фаззифицируется для ее интерпретации.

Альтернативным способом получения объективной информации об ИНП является получение количественных характеристик о степени сходства или различия ИНП между собой и их кластеризации, т.е. принятием решения о возможности считать наборы характеристик $\{y_{ij}\}$ пространственно локализованной группой, т.е. кластером.

Особенность данного способа связана с использованием для расчетов данных по одноименным характеристикам ИНП. Действительно, если представить (1) в виде матрицы $MY[1\dots m,1..n]=\{y_{ij}\}$ (*таблица 1*), то традиционный подход состоит в вычислении выходной переменной по ее строкам с интерпретацией результата.

Напротив, обход и обработка матрицы характеристик ИНП $\{y_{ij}\}$ (*таблица 1*) по столбцам позволяют получить объективные данные об ИНП по ее характеристикам (новизна, трудоемкость, коммерциализация, обеспечение):

- оценить степень близости значений в пределах столбца в рамках нечеткой логики и математики;
- получить количественные характеристики – вес, важность, кучность, обособленность и др.;
- получить статистические характеристики – среднее, дисперсия, размах вариации и др.;
- проанализировать сравнительные оценки характеристик столбцов и ранжировать столбцы на предмет выявления лидеров/аутсайдеров ИНП.

Вычисление количественных значений по кластерам (мощность, математическое ожидание, дисперсия и др.) выступает как получение дополнительной информации, позволяющей если не ранжировать альтернативы, то сформировать *поправочные коэффициенты (веса)* на основе вычисления близости/расхождения между одноименными нечеткими переменными векторов (1).

Для определения сходства или различия между ИНП по столбцам матрицы (*таблица 1*) можно применять:

- логические операции над нечеткими переменными (разность, исключающая сумма, ограниченная разность, несвязная сумма);

**Таблица 1**
Матричное представление

| | | | | | | Механизм вычисления | Способ вычисления |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $InP_1$ | $y_{11}$ | $y_{12}$ | $y_{13}$ | $y_{14}$ | $y_{15}$ | база правил ЕСЛИ ТО | нечеткий вывод |
| $InP_2$ | $y_{21}$ | $y_{22}$ | $y_{34}$ | $y_{44}$ | $y_{25}$ | "-" | "-" |
| … | … | … | … | … | … | | |
| $InP_m$ | $y_{m1}$ | $y_{m2}$ | $y_{m3}$ | $y_{m4}$ | $y_{m5}$ | "-" | "-" |
| Механизм вычисления | поиск и оценка сходства /различия | "-" | "-" | "-" | "-" | | |
| Способ вычисления | нечетко-статист. вычисления | "-" | "-" | "-" | "-" | | |

● расстояния между нечеткими переменными (расстояние Хэмминга, расстояние Евклида, нечеткое расстояние).

В частности, логические операции вычисления разности, ограниченной разности над парами одноименных переменных позволяют получить нечеткие разности и на основе их сравнения принимать решения о степени сходства/различия абсолютных нечетких значений.

Вычисление расстояния между ИНП, прежде всего нечеткого расстояния, позволяет получить количественную оценку и в дальнейшем вести ее обработку параллельно с собственно нечеткими значениями характеристик ИНП.

Результатом обработки матрицы нечетких переменных ИНП – принятие решения о наличии кластеров среди данных-столбцов по степени пространственной локализации отдельных значений и назначении весов характеристик ИНП по настраиваемым пользователем параметрам (нижние, верхние пороги) и параметрам, вычисляемым по совокупности значений матрицы нечетких переменных ИНП.

Таким образом, необходимо получить следующие функции и алгоритмы их вычислений

$$\forall j \,|\, (w[j] = \varphi(MY[j,1...N], \Delta_1[1...T_1]), j = 1-m \quad (2)$$

$$\forall j \,|\, (Cluster[j](MY[j,1...N], \Delta_2[1...T_2]) = \begin{cases} 0, & j-й \ столбец \ неоднороден \\ 1, & j-й \ столбец \ однороден \end{cases} \quad (3)$$

где $\varphi$ - функция вычисления веса $w[j]$;
$\Delta_1$ – настраиваемые параметры;
$T_1$ – число настраиваемых параметров;
*Cluster []* – функция определения кластера;
$\Delta_2$ – настраиваемые параметры;
$T_2$ – число настраиваемых параметров.

### Метод решения

Пусть A, B – одноименные нечеткие переменные из массива MY[1..m, 1..n], представлены в виде нечетких множеств $A^{\sim}=\{\mu_A(x)|x\}$ и $B^{\sim}=\{\mu_B(x)|x\}$ где $\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$ – функции принадлежности, принимающие значения в некотором универсальном множестве X=[0,1]. Эти функции принадлежности указывают степень (или уровень) принадлежности элемента $x$ к нечеткому множеству $A^{\sim}$ или $B^{\sim}$ на диапазоне вещественных чисел [0,1] соответственно:

$$\mu_A(x): X \to [0,1], \quad \mu_B(x): X \to [0,1]$$

Для определения степени сходства/различия между переменными будут использоваться следующие логические операции: разность и ограниченная разность, несвязная сумма

Разностью нечетких множеств $A,B$ является нечеткое множество $A - B = A \cap \overline{B}$ с функцией принадлежности

$$\mu_{A \cap \overline{B}} = min(\mu_A(x)\, 1 - \mu_B(x)), \ \forall x \in X \quad (4)$$

Ограниченная разностью нечетких множеств $A,B$ является нечеткое множество $A \,\theta\, B$ с функцией принадлежности

$$\mu_{A\theta B} = \max(0, \mu_A(x) - \mu_B(x)), \ \forall x \in X \quad (5)$$

Операция ограниченной разности $A \,\theta\, B$ не является ассоциативной. Она своим положительным значением показывает на конкретном носителе значения переменной $(x_i)$ превышение переменной $A$ над переменной $B$, т.е. вычисляет отношение $A>B$, но не вычисляет расстояние между $A$, $B$.

Наконец, для определения сходства/различия между переменными $A$, $B$ целесообразно рассмотреть логическую операцию несвязной суммы $A\Delta B$ с функцией принадлежности

$$\mu_{A\Delta B} = |\mu_A(x) - \mu_B(x)|, \ \forall x \in X \quad (6)$$

Далее на носителе значений переменных с 5 делениями принимаются

$A=\{0,1|x_1, 0,5|x_2, 1,0|x_3, 0,7|x_4, 0,3|x_5\}$
$B=\{0,2|x_1, 0,4|x_2, 0,6|x_3, 0,8|x_4, 1,0|x_5\}$

Можно считать, что переменная $A$ имеет форму, соответствующую MIDDLE, а форма переменной $B$ соответствует HIGH из традиционных базовых терм-множеств лингвистической переменной.

Для дальнейших расчетов

$\overline{A}=\{0,9|x_1, 0,5|x_2, 0,0|x_3, 0,3|x_4, 0,7|x_5\}$
$\overline{B}=\{0,8|x_1, 0,6|x_2, 0,4|x_3, 0,2|x_4, 0,0|x_5\}$

Тогда

$A - B = A \cap \overline{B} = \{0,1|x_1, \ 0,5|x_2, \ 0,4|x_3, \ 0,2|x_4, \ 0,0|x_5\}$

$A \,\theta\, B = \{0,0|x_1, 0,1|x_2, 0,4|x_3, 0,0|x_4, 0,0|x_5\}$

$A \,\Delta\, B = \{0,1|x_1, 0,1|x_2, 0,4|x_3, 0,1|x_4, 0,7|x_5\}$

$B - A = B \cap \overline{A} = \{0,2|x_1, \ 0,4|x_2, \ 0,0|x_3, \ 0,3|x_4, \ 0,7|x_5\}$

Сравнение результатов вычисления разности показывает, что для отношения $A>B$ наиболее близкий результат формируется операцией ограниченной разности. Фаззификация

$A \,\theta\, B = \{0,0|x_1, 0,1|x_2, 0,4|x_3, 0,0|x_4, 0,0|x_5\}$

дает наиболее точную оценку разности, так как на одноименных делениях носителях значения фактически выполняется вычитание. Другие операции разности дают завышенную оценку, возможно потому, что в них частично учитываются ситуации обратного превышения значений на одноименных делениях носителях [3,4,7].

Нечеткое расстояние $d(A,B)$ на основе принципа обобщения Л.Заде представлено нечетким множеством, где $A,B$ – нечеткие переменные, между которыми вычисляется дистанция, т.е. изначально неотрицательная величина. Функция принадлежности $\mu_{d(A,B)}$ вычисляется как максминная процедура,

$$\mu_{d(A,B)}(\delta) = \max_{\delta \in d(A,B)} \left[\min(\mu_A(x_i)\ \mu_B(x_i)\right] \quad (7)$$

$$\forall\, x + i \in X$$

Особенность вычисления нечеткого расстояния связана с тем, что носители переменных *A,B* (уровни по оси OX) не являются совмещенными (как принято для стандартных логических операций). Количество делений для переменной $\mu_{d(A,B)}$ по оси OX также соответствует количеству делений переменных *A,B*, т.е. равно 5. Тем не менее, деления $\mu_{d(A,B)}$ формируются на основе нетривиального декартово произведения носителей *A,B* со смещением делений, что позволяет сопоставить все значения переменных *A,B* с учетом их порядка следования в парах. Наборы соединений значений нечетких переменных *A,B* от полного совпадения (по количеству элементов области определения) до набора с одноэлементным соединением значений для переменных *A,B*.

Для обеспечения выбора лучшей альтернативы (ИНП), применяются метод и алгоритм нечетко-статистической обработки одноименных характеристик ИНП.

Метод состоит из следующих шагов:

а) вычисление по столбцам матрицы нечетких расстояний между парами значений с числом размещений $A^2_m+1$ и формирование матрицы нечетких расстояний;

б) вычисление по столбцам матрицы нечеткой разности и ограни-ченной разности между парами значений с числом сочетаний $C^2_m$ и формирование матриц разностей и ограниченной разностей значений;

в) проверка близости матриц разностей и ограниченной разностей значений на основе настраиваемого порога и формирование проверочного флага разностей;

г) фаззификация матрицы нечетких расстояний и расчет массива коэффициентов вариации по столбцам матрицы;

д) проверка уровня однородности по столбцам матрицы расстояний на основе настраиваемого порога и формирование проверочного флага однородности;

е) назначение весов (коэффициентов важности) характеристик ИНП на основе сравнения уточненных коэффициентов вариации и настраиваемых порогов.

Новизна метода заключается в комбинировании нечетких и статистических вычислений с настраиваемой проверкой, что позволяет совместно учесть абсолютные и относительные значения нечетких характеристик ИНП и пропорционально назначить им веса. Данные веса совместно с проверочными флагами обеспечивают для ЛПР выбор лучшего ИНП не только на основе нечеткого вывода, но и на основе информации о кластерах и назначенных весах.

В каждом наборе соединения значений переменных формируются как пары без повторов, но с учетом порядка следования элементов в паре, что необходимо для вычисления нечеткого расстояния на декартовом произведении исходных переменных.

Значение нечеткого расстояния вычисляется нестандартно по сравнению с логическими операциями. Носитель значения нечеткого расстояния формируется на модифицированном декартовом произведении исходных носителей переменных. Суть модификации состоит в трактовке носителей как строк и получении выходного носителя значений путем смещения между собой исходных строк-носителей и образования регулярных неповторяющихся пар элементов (делений носителей) с учетом следования значений носителей в парах.

Пусть нечеткие переменные *A,B* задаются на носителе размером p делений, т.е. считается, что имеются две строки $s_A$, $s_B$ длиной в *p* символов. Строка $s_A$ называется базовая строка (строка-платформа). Строка $s_B$ называется перемещаемая строка (строка-поезд).

Алгоритм обработки строк-носителей и формирования пар элементов носителей *A,B* основан на следующих строковых операциях:

1) посимвольного совмещения строк с учетом следования делений в носителях и образование одноименных пар исходных носителей – формирование пар для начального деление носителя нечеткого произведения;

2) цикл от $q=1$ до $q \le (|s_B|-1)$ с шагом +1;

3) сдвига влево на q символ строки-поезда относительно строки-платформы;

4) вычисление обращения строки-поезда и ее правой конкатенации;

5) левой аннуляции *q* символов из обращения и сдвиг влево на *q* символ, где *q* – номер итерации;

6) правого расширения строки-платформы по длине обращенной строки-поезда значениями на 1 больше, чем значения оставшиеся значения обращенной строки – формирование пар для текущего деления носителя нечеткого произведения;

7) Конец цикла.

На *рисунке 1* для $p=6$ показан шаг цикла алгоритма обработки строк-носителей и формирования пар элементов носителей для нечеткого расстояния. Цветом показаны диагонально расположенные элементы носителей, относительно

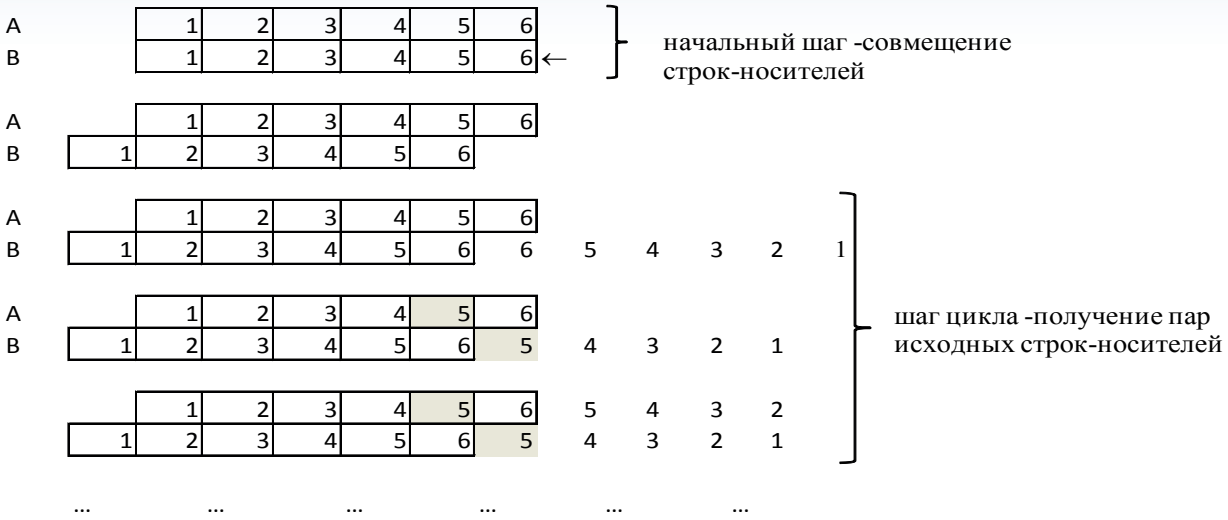



**Рис. 1.** Шаг цикла алгоритма обработки строк-носителей

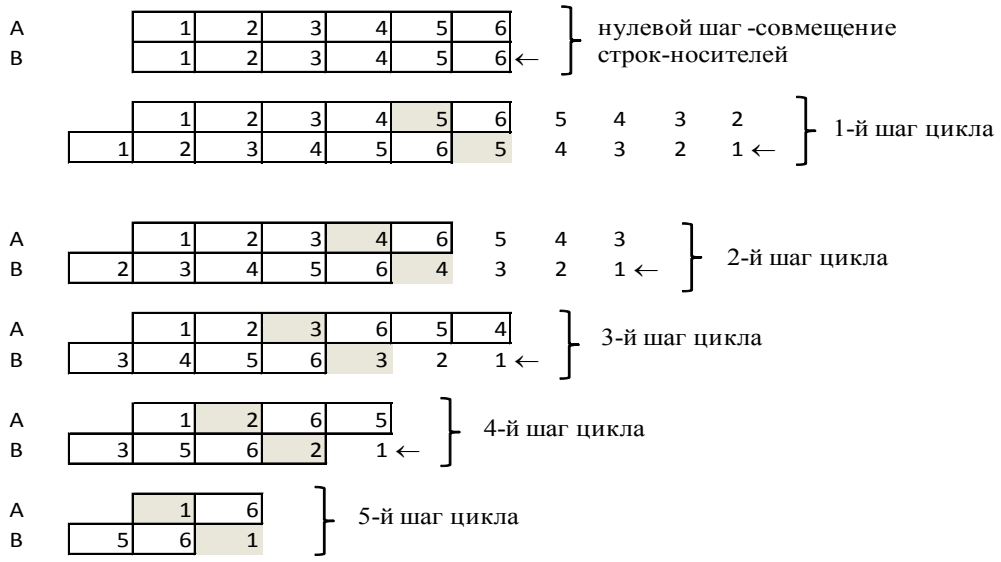



**Рис. 2.** Алгоритм обработки строк-носителей для $p$=6

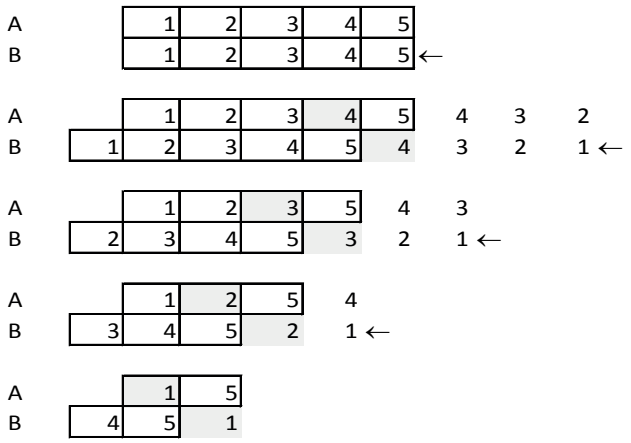


**Рис. 3.** Алгоритм обработки строк-носителей для $p$=5

которых происходит присоединение элементов с убывающим значениями. Это так называемая строковая обработка с комбинацией алгоритмов обращения слов и обработки индексов массивов, которая может быть реализована на основе продукционно-арифметических операций [5].

Начальный набор пар элементов носителей
{(1,1), (2,2), (3,3), (4,4), (5,5), (6,6)}.

В результате 1-го шага работы алгоритма для текущего деления носителя значения нечеткого расстояния получено множество пар

{(1,2), (2,3), (3,4), (4,5), (5,6), (6,5), (5,4), (4,3), (3,2), (2,1)}

На *рисунке 2* показан результат работы алгоритма обработки строк-носителей.

На 2-м шаге работы алгоритма получено множество пар

{(1,3), (2,4), (3,5), (4,6), (6,4), (5,3), (4,2), (3,1)}.

На 3-м шаге работы алгоритма получено множество пар

{(1,4), (2,5), (3,6), (6,3), (5,2), (4,1)}.

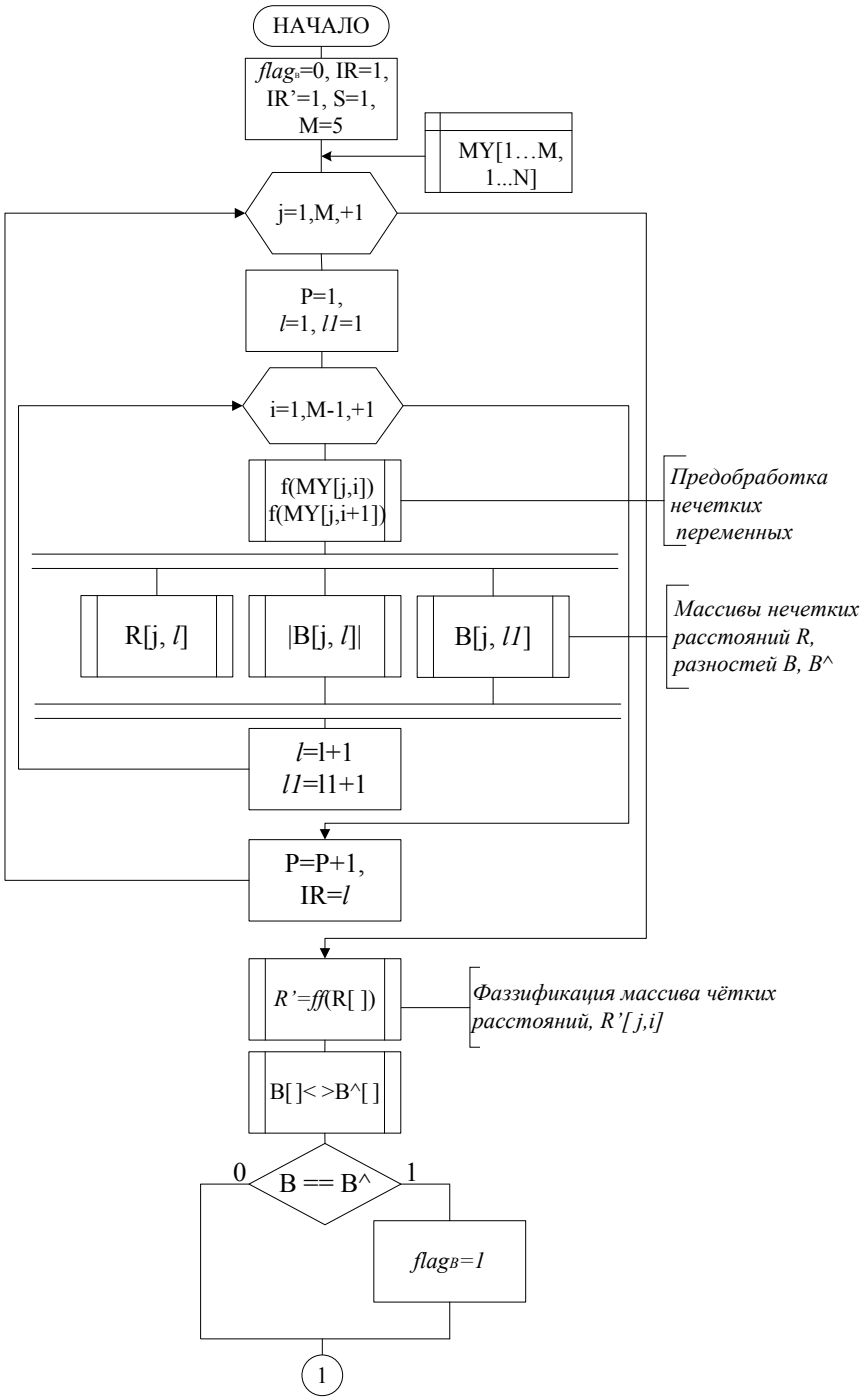



**Рис. 4.** Алгоритм нечетко-статистической обработки характеристик ИНП (начало)

На 4-м шаге работы алгоритма получено множество пар

{(1,5), (2,6), (6,2), (5,1)}.

На 5-м (заключительном) шаге работы алгоритма получено множество пар

{(1,6), (6,1)}.

На *рисунке 3* показан результат работы алгоритма обработки строк-носителей при $p=5$.

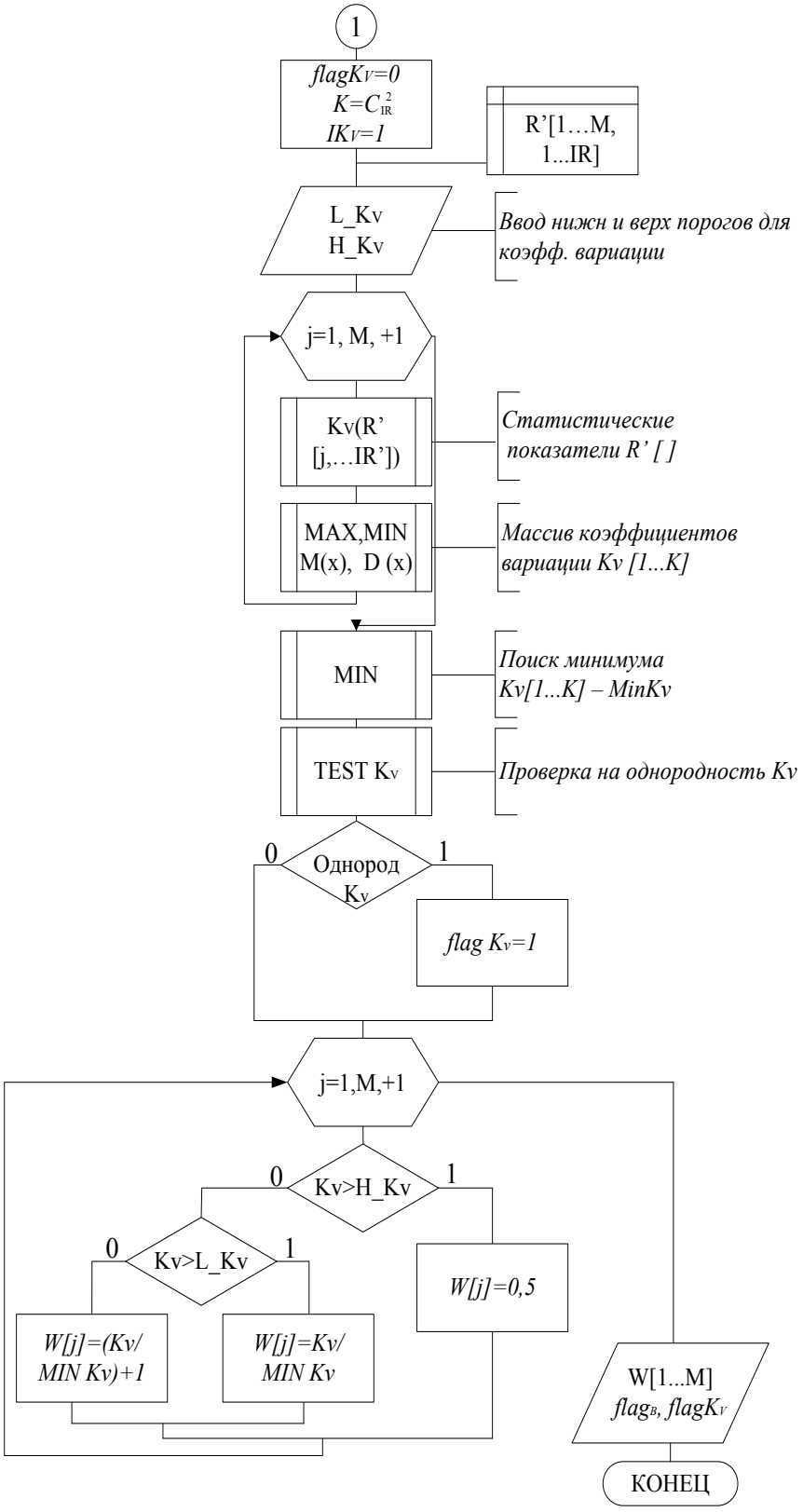



**Рис. 4.** Алгоритм нечетко-статистической обработки характеристик ИНП (окончание)

Количество создаваемых пар в теле цикла с учетом условия (8) представляет число размещений из $m$ элементов по 2, т.е. $A^2_m$. Общее число создаваемых пар с учетом начального набора равно $A^2_m+1$.

Оригинальность алгоритма связана с объединен ной трактовкой носителей значений переменных как строк, а также как массивов. Строковая структура данных поддерживает операции сдвига, конкатенации, аннуляции и др. Структура данных «массив» использует индексацию элементов для произвольного доступа к ним без затрат времени, свойственных символьным структурам, что позволяет уменьшить затраты времени на генерацию пар элементов носителей для нечеткого расстояния.

Далее на сформированных наборах элементов носителей собственно реализуются логические операции в соответствии с (7), т.е. вычисляется нечеткое расстояние.

Для формализации всех вычислительных действий введены следующие структуры данных:

- *MY[1 …m, 1 …n]* – массив характеристик ИНП;
- $n$ – количество проектов;
- $m$ – количество нечетких переменных (характеристик), описывающих проект;
- *R[1 …m, 1 …$l_1$]* – массив нечетких расстояний;
- $l_1$ – размер массива $R$;
- *B[1 …m, 1 …$l_2$]* – массив разностей нечетких переменных;
- *B^[1 …m, 1 …l2]* – массив ограниченных разностей нечетких переменных;
- *l2* – размер массивов $B$, $B^{\wedge}$;
- *fh* – нечеткий порог сходства/различия массивов разностей $B$,$B^{\wedge}$;
- $flag_B$ – битовый флаг сходства/различия массивов $B$,$B^{\wedge}$;
- $flag_B$ – битовый флаг;
- *R'[1 …m, 1 …l1]* – массив расстояний;
- *Kv[1…m]* – массив коэффициентов вариаций;
- *IKv* – индекс массива коэффициентов вариаций;
- *Conflict [1..L]* – массив индексов конфликтных характеристик;
- *L_Kv* – нижний порог однородности ИНП;

**Таблица 2**

Вычисление нечеткого расстояния

| $\delta \in d(A,B)$ | $a \in A$ | $b \in B$ | $\mu_A(a)$ | $\mu_B(b)$ | $min(\mu_A(x_i)\ \mu_B(x_i)$ | $\mu_{d(A,B)}(\delta)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,7 |
| | 2 | 2 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | |
| | 3 | 3 | 1,0 | 0,6 | 0,6 | |
| | 4 | 4 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | |
| | 5 | 5 | 0,3 | 1,0 | 0,3 | |
| 1 | 1 | 2 | 0,1 | 0,4 | 0,1 | 0,8 |
| | 2 | 3 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | |
| | 3 | 4 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | |
| | 4 | 5 | 0,7 | 1,0 | 0,7 | |
| | 5 | 4 | 0,3 | 0,8 | 0,3 | |
| | 4 | 3 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | |
| | 3 | 2 | 1,0 | 0,4 | 0,4 | |
| | 2 | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,2 | |
| 2 | 1 | 3 | 0,1 | 0,6 | 0,1 | 1,0 |
| | 2 | 4 | 0,5 | 0,8 | 0,5 | |
| | 3 | 5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | |
| | 5 | 3 | 0,3 | 0,6 | 0,3 | |
| | 4 | 2 | 0,7 | 0,4 | 0,4 | |
| | 3 | 1 | 1,0 | 0,2 | 0,2 | |
| 3 | 1 | 4 | 0,1 | 0,8 | 0,1 | 0,5 |
| | 2 | 5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 | |
| | 5 | 2 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | |
| | 4 | 1 | 0,7 | 0,2 | 0,2 | |
| 4 | 1 | 5 | 0,1 | 1,0 | 0,1 | 0,2 |
| | 5 | 1 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | |

• $H_Kv$ – верхний порог однородности характеристики ИНП;

• $flag_{Kv}$ – битовый флаг однородности.

Каждая запись в $MY=\{y_{ij}\}$ состоит из двух полей: $y_{ij}$ – значения характеристики, $mm$ – маски характеристики, используемой на шаге проверки однородности столбца матрицы характеристик.

Блок-схема алгоритма нечетко-статистической обработки характеристик ИНП представлена на *рисунке 4*.

Содержательная сущность алгоритма связана с выполнением расчетно-проверочных действий и формированием рекомендаций по выделению кластеров и назначению весов для характеристик ИНП на основе совместного учета нечетких и статистических решений.

Новизна алгоритма нечетко-статистической обработки характеристик ИНП заключается в применении расширенного набора нечетких операций для определения сходства/различия проектов между собой. Вычисление нечетких расстояний составляет основу данного алгоритма. При этом формируемые дистанции между проектами получаются на основе известной максминной процедуры обобщения, что позволяет избежать проблемы трактовки отрицательного результата в традиционных операциях нечеткого сравнения, вычитания функций принадлежности.

Практическая ценность данного алгоритма связана с распараллеливанием вычислений по парам одноименных характеристик проектов, что позволяет при необходимости, не меняя структуры алгоритма, добавить новые операции сравнения нечетких переменных в блок параллельных вычислений, например, нечеткого ранжирования.

**Модельные расчеты**

В *таблице 2* приведены расчеты значений нечетких расстояний для $p=5$ и значений нечетких переменных [2]:

$A=\{0,1|x_1, 0,5|x_2, 1,0|x_3, 0,7|x_4, 0,3|x_5\}$

$B=\{0,2|x_1, 0,4|x_2, 0,6|x_3, 0,8|x_4, 1,0|x_5\}.$

$$\mu_{d(A,B)}(\delta)=\max_{\delta\in d(A,B)}(\min(\mu_A(x_i)\ \mu_B(x_i))$$

Таким образом, нечеткое расстояние описы-

**Таблица 3**

Вычисление нечеткого расстояния

| $\delta \in d(C,D)$ | $c \in C$ | $d \in D$ | $\mu_C(c)$ | $\mu_D(d)$ | $\min(\mu_C(x_i)\ \mu_D(x_i))$ | $\mu_{d(C,D)}(\delta)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,7 |
| | 2 | 2 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | |
| | 3 | 3 | 0,9 | 0,7 | 0,7 | |
| | 4 | 4 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | |
| | 5 | 5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | |
| 1 | 1 | 2 | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 0,6 |
| | 2 | 3 | 0,4 | 0,7 | 0,4 | |
| | 3 | 4 | 0,9 | 0,6 | 0,6 | |
| | 4 | 5 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | |
| | 5 | 4 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | |
| | 4 | 3 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | |
| | 3 | 2 | 0,9 | 0,4 | 0,4 | |
| | 2 | 1 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | |
| 2 | 1 | 3 | 0,2 | 0,7 | 0,2 | 0,4 |
| | 2 | 4 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | |
| | 3 | 5 | 0,9 | 0,3 | 0,3 | |
| | 5 | 3 | 0,4 | 0,7 | 0,4 | |
| | 4 | 2 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | |
| | 3 | 1 | 0,9 | 0,1 | 0,1 | |
| 3 | 1 | 4 | 0,2 | 0,6 | 0,2 | 0,4 |
| | 2 | 5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | |
| | 5 | 2 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | |
| | 4 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,1 | |
| 4 | 1 | 5 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,2 |
| | 5 | 1 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | |

вается нечетким множеством

d(A,B)={0,7|$\delta_1$, 0,8|$\delta_2$, 1,0|$\delta_3$, 0,5|$\delta_4$, 0,2|$\delta_5$}.

Фаззификация расстояния приводит к четкому значению $D_{AB}$

$$D_{AB} = \frac{0 \cdot 0{,}7 + 1 \cdot 0{,}8 + 2 \cdot 1{,}0 + 3 \cdot 0{,}5 + 4 \cdot 0{,}2}{0{,}7 + 0{,}8 + 1{,}0 + 0{,}5 + 0{,}2} = \frac{5{,}1}{3{,}2} = 1{,}59$$

Как ранее указывалось, переменные *A,B* имеют несовпадающие формы (MIDDLE, HIGH). Этим можно объяснить достаточно большие значения расстояний по отдельным уровням носителя $\delta \in d(A,B)$.

Далее рассматриваются две нечеткие переменные

$$C = \{0{,}2/c_1,\ 0{,}4/c_2,\ 0{,}9/c_3,\ 0{,}5/c_1,\ 0{,}4/c_5\}$$
$$D = \{0{,}1/d_1,\ 0{,}4/d_2,\ 0{,}7/d_3,\ 0{,}6/d_4,\ 0{,}3/d_5\},$$

удовлетворяющие условиям [4]:

- функция принадлежности выпуклая;
- функция принадлежности нормальная;
- функция принадлежности непрерывная.

*Таблица 3* содержит расчеты значений нечетких расстояний для *C,D*.

Теперь нечеткое расстояние описывается нечетким множеством

*d(C,D)*={0,7|$\delta_1$, 0,6|$\delta_2$, 0,4|$\delta_3$, 0,4|$\delta_4$, 0,2|$\delta_5$}.

Фаззификация расстояния приводит к четкому значению $D_{CD}$

$$D_{CD} = \frac{0 \cdot 0{,}7 + 1 \cdot 0{,}6 + 2 \cdot 0{,}4 + 3 \cdot 0{,}4 + 4 \cdot 0{,}2}{0{,}7 + 0{,}8 + 1{,}0 + 0{,}5 + 0{,}2} = \frac{5{,}1}{3{,}2} = 1{,}48$$

Сравнение четких расстояний $D_{AB}$ и $D_{CD}$ показывает, что для близко корреляционных операндов (*C,D*) расстояние вычисляется как ожидаемо более меньшее, чем для слабо корреляционных операндов (*A,B*).

Главное преимущество переменной нечеткого расстояния заключается в получении по элементам носителя оценок дистанций, т.е. заведомо неотрицательных чисел, что позволяет абстрагироваться и вести дальнейшие вычисления без привязки к исходной матрице *MY[1…m,1…n]*.

Теперь рассмотрению подлежит массив четких расстояний между парами одноименных характеристик ИНП на предмет выявления среди них однородных образований, т.е. кластеров. Общепризнанной статистической характеристикой однородности группы значений является коэффициент вариации. Если коэффициент вариации более 33%, то такая группа существенно разнородна и не образует кластер.

В работе принимается подход к заданию настраиваемых нижнего и верхнего порогов. Тогда в результате стандартного расчета коэффициента вариации *Kv* по каждому столбцу массива *R'[1 … m,1 ..l]* можно:

- выделить среди столбцов массива *R'[1 … m,1 ..l]* кластеры;
- назначить веса столбцам массива *R'[1 … m,1 ..l]*, исходя из мнения ЛПР.

Такая гибкая настройка завершающей стадии алгоритма нечетко-статистической обработки характеристик ИНП позволяет ввести дополнительную, основанную на корректных расчетах информацию и использовать ее при нечетком выводе для уточнения итогового значения эффективности ИНП или использовать полученные сведения о кластерах и весах характеристик для выбора лучшего(их) проектов в условиях неопределенности.

Пусть по одноименной характеристике ИНП рассматриваются 4 набора расстояний *R1, R2, R3, R4*, полученных после фаззификации, на предмет выявления среди них кластеров и пусть

| № | набор1 R1 | набор2 R2 | набор2 R3 | набор2 R4 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,33 |
| 2 | 0,3 | 0,6 | 0,55 | 0,4 |
| 3 | 0,5 | 0,8 | 0,64 | 0,28 |
| 4 | 0,45 | 1 | 0,44 | 0,36 |
| 5 | 0,65 | 1,2 | 0,52 | 0,4 |
| 6 | 0,5 | 1,6 | 0,62 | 0,3 |
| 7 | 0,25 | 0,8 | 0,62 | 0,38 |
| 8 | 0,44 | 0,9 | 0,58 | 0,42 |
| 9 | 0,7 | 1,2 | 0,6 | 0,33 |
| 10 | 0,33 | 0,6 | 0,55 | 0,36 |

| статистические показатели | | набор1 R1 | набор2 R2 | набор2 R3 | набор2 R4 |
|---|---|---|---|---|---|
| макс | | 0,7 | 1,6 | 0,64 | 0,42 |
| мин | | 0,2 | 0,4 | 0,44 | 0,28 |
| размах вариации | | 0,5 | 1,2 | 0,2 | 0,14 |
| ср линейн отклонение | | 0,1296 | 0,272 | 0,0456 | 0,0368 |
| D(R)г | | | | | |
| D(R)в | | 0,027084 | 0,125444 | 0,003551 | 0,002093 |
| σ(R)г | | | | | |
| σ(R)в | | 0,164574 | 0,354181 | 0,059591 | 0,045753 |
| коэфф вариации | | 0,380957 | 0,38921 | 0,10418 | 0,12852 |
| коэфф осцилляции | | 1,157407 | 1,318681 | 0,34965 | 0,393258 |
| M(R) | | 0,432 | 0,91 | 0,572 | 0,356 |

**Рис. 5.** Расчет статистических характеристик

используются нижние и верхние пороги (критерии) со значениями 12% и 17%.

На *рисунке 5* приведен расчет стандартных статистических показателей: математическое ожидание M(R), размах вариации, среднее линейное отклонение, дисперсия (выборочное) D(R), среднеквадратичное отклонение (выборочное) $\sigma(R)$, коэффициент вариации *Kv*, коэффициент осцилляции.

На основе значений коэффициента вариации можно прийти к следующим рекомендациям:

- наборы *R1*, *R2* не образуют кластеры, значения в их составе представляют собой обособленные числа, которые с практической точки зрения можно трактовать как тривиальные или высокоуникальные ИНП (в рамках входной характеристики ИНП);
- наборы *R3*, *R4* образуют кластеры, причем *R3* трактуется как высоко однородный кластер (*R3<12%*), а *R4* - как однородный кластер (*R4<17%*).

**Обсуждения и выводы**

На основе полученных решений (рекомендаций для ЛПР) на заключительном этапе алгоритма назначаются веса по каждой характеристике ИНП. В общем случае целесообразно предусмотреть 2 стратегии назначения весов:

- стратегия приоритета обособленных значений (приоритет уникальных (как правило, рисковых) ИНП);
- стратегия приоритета кластеров (приоритет группы ИНП).

В первом случае неразличимыми по важности становятся проекты, имеющие слабые связи между собой и потому малый интерес со стороны потребителя. Во втором случае установлено, что в составе матрицы характеристик присутствуют проекты достаточно близкие по связям, содержанию и потому представляющие интерес для потребителя.

В зависимости от мнения ЛПР, учитываемого в алгоритме, можно назначить максимальные веса на уникальные проблемно-поисковые проекты, или достаточно известные по тематике инновационные проекты.

Таким образом, алгоритм нечетко-статистической обработки характеристик ИНП состоит из чередования этапов вычислений и задании настроечных переменных, что с практической позиции позволяет моделировать и исследовать различные организационно-экономические описания проектов (модели от оптимистического доверия до ревизионной проверки проектов).

Для управления ИНП в рамках вуза разработаны математические средства в виде метода и алгоритма, отличающиеся комбинацией нечетких и статистических вычислений, чередовании этапов вычислений и настроек, что позволяет использовать сильные стороны аппаратов нечеткой математической логики и статистики для выбора лучших проектов и моделирования рисков их реализации.

**Литература**

1. Туккель И.Л., Голубев С.А., Сурина А.В., Цветкова Н.А. Методы и инструменты управления инновационным развитием промышленных предприятий: монография. СПб: БХВ-Петербург, 2013. 208 с.
2. Огнев И.В., Борисов В.В., Сутула Н.А. Ассоциативная память, среды, системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2016. 420 с.
3. Сизов А.С., Халин Ю.А. Формализация оценки конкурентоспособности предприятия на основе теории нечеткости// Информационно-измерительные и управляющие системы, 2011. №11. Т.9. С.67-71.
4. Халин Ю.А., Сизов А.С., Альков В.В. Конкурентоспособность предприятия: модели и методы оценки: монография. Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2018. 196 с.
5. Кузьбожев Э.Н., Можейко А.Г., Халин Ю.А. Управление инновационными процессами на основе интеллектуальных информационных технологий// Известия Юго-Западного государственного университета, 2011. №6. С.83-86.
6. Халин Ю.А. Математическая модель оценки конкурентоспособности предприятия на основе теории нечетких множеств/ Математические и компьютерные методы в технических, гуманитарных и общественных науках. Монография под ред. проф. В.И. Левина, 2011. С.7-19.
7. Листратенко Я.В., Халин Ю.А. Нечетко-множественный подход к оценке кадрового потенциала предприятия// В сборнике: Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы. Материалы докладов IV региональной заочной научно-практической конференции «ИИС-2016», 2017. С.144-146.

УДК 512.542.66

# ТЕОРЕТИКО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ

# THEORETICAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS OF TRANSFORMATION FUNCTIONS OF INFORMATION AND CRYPTOGRAPHIC SYSTEMS

Инна Александровна Мартынова
*кандидат физико-математических наук*
преподаватель кафедры
«Радиофизики и электроники»
СФТИ НИЯУ МИФИ
Адрес: 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2
Тел.: +7 (915) 935 99 17
E-mail: martina1204@yandex.ru

**Аннотация**
Информационно-криптографические системы стали доступны для широкого анализа всего несколько десятилетий назад, и с тех пор сложилось устойчивое мнение, что функции прямого и обратного преобразования в них должны быть неизменными и, как правило, заранее известными. Это приводит к тому, что стойкость системы напрямую зависит от сложности этих функций, обеспечивающих рассеивание и перемешивание информации и знания ключа. В работе предложено введение переменных функций в информационно-криптографическую систему и проведен их теоретико-функциональный анализ.
**Ключевые слова:** система, сообщение, функции преобразования, криптограмма, стойкость, неопределенность, энтропия.

**Summary**
Information and cryptographic systems became available to the wide analysis only several decades ago and since then there was a steady opinion that functions of direct and return transformation to them have to be invariable and, as a rule, in advance known. It leads to the fact that firmness of system directly depends on complexity of these functions providing dispersion and hashing of information and knowledge of a key. In work introduction of variable functions to information and cryptographic system is offered and the function-theoretic analysis is carried out them.
**Keywords:** system, message, transformation functions, cryptogram, firmness, uncertainty, entropy.

## Введение

Известно, что информационно-криптографическая система определяется, как некоторое отображение множества сообщений ($M$) на множество криптограмм ($E$) при помощи конкретного ключа ($K$). Каждое отображение представляется функцией преобразования $E=F(M,K)$. Для того, чтобы из криптограммы получить сообщение выполняются обратные преобразования $M=F^{-1}(E,K)$. Основными функциями преобразования являются функции подстановки и перестановки, обеспечивающие рассеивание и перемешивание информации.

Априорные вероятности ключа и сообщения являются априорными знаниями злоумышленника относительно информационно-криптографической системы, который обладает также априорными знаниями функциональной зависимости относительно множества отображений сообщений на множество криптограмм, но не знает конкретного ключа. После того как злоумышленник перехватит криптограмму, он может вычислить апостериорные вероятности различных сообщений. Необходимое и достаточное условие совершенной стойкости [1-3], определяется выражением:

$$P_E(M)\frac{P(M)P_M(E)}{P(E)}, \qquad (1)$$

где $P(M)$ – априорная вероятность сообщения;
$P_M(E)$ – условная вероятность криптограммы при условии, что выбрано сообщение $M$, т.е. сумма вероятностей всех тех ключей, которые переводят сообщение $M$ в криптограмму $E$;
$P(E)$ – вероятность получения криптограммы $E$;
$P_E(M)$ - апостериорная вероятность сообщения $M$

при условии, что перехвачена криптограмма $E$.

Стойкость системы определяется равенством априорной $P(M)$ и апостериорной $P_E(M)$ вероятностей сообщения независимо от их величины. Данные вероятности не должны зависеть от сообщения, число различных ключей должно быть не меньше числа сообщений [1-3].

Количественно информацию систем измеряют с помощью энтропии, которая включает в себя два статистических выбора: сообщения и ключа. Она является мерой неопределенности, которая имеется во множестве сообщений и характеризует статистические свойства множества независимо от его мощности [1-3]. Количество информации в сообщении, определяется выражением:

$$H(M)=-\sum P(M)\ log\ P(M). \qquad (2)$$

Аналогично неопределенность ключа, определяется выражением:

$$H(K)= -\sum P(K)\ log\ P(K). \qquad (3)$$

В совершенно стойких системах максимальное количество информации в сообщении равно $logn$ (эта величина достигается для равновероятных сообщений). Информация может быть скрыта полностью лишь тогда, когда неопределенность ключа не меньше $logn$. То есть, существует предел, которого нельзя превзойти при заданной неопределенности ключа – количество неопределенности, которое может быть введено в систему, не может быть больше неопределенности ключа. Отсюда следует естественный вывод, что объем ключа должен быть не меньше объема исходного сообщения [1-3].

Любая криптографическая система обладает теоретической и практической стойкостью [1-3]. Анализ теоретической стойкости позволяет оценить надежность системы, когда злоумышленник не ограничен во времени и обладает всеми необходимыми средствами для анализа криптограмм. Анализ практической стойкости позволяет оценить надежность системы, когда злоумышленник располагает ограниченным временем и ограниченными вычислительными возможностями для анализа криптограмм.

В информационно-криптографических системах используется два общих принципа преобразования информации: рассеивание и перемешивание, которые обеспечивается подстановками и перестановками. На базе простейших криптографических систем можно строить системы любой сложности. Наиболее известными примерами блочных алгоритмов, основанных на принципах рассеивания и перемешивания, являются криптографические алгоритмы ЛЮЦИФЕР, DES и ГОСТ 28147-89.

**Постановка задачи**

Конструктивное определение информационно-криптографической системы с точки зрения теории систем [10] может быть представлено как:

$$S^{def} < M, F, F^{-1}, K, E, R, A> \qquad (4)$$

где $M$ – множество сообщений, $M=\{M_1, M_2, M_3, \dots, M_n\}$;

$F, F^{-1}$ – прямая и обратная функции преобразования;

$K$ – множество ключей, $K=\{K_1, K_2, K_3, \dots, K_n\}$;

$E$ – множество криптограмм, $E=\{E_1, E_2, E_3, \dots, E_n\}$;

$R$ – множество отношений между элементами системы, $R=\{R_1, R_2, R_3, \dots, R_n\}$;

$A$ – аналитик (злоумышленник).

Множество отношений между элементами информационно-криптографической системы, как и само определение, может дополнительно включать в свой состав структуру и объем сообщений, варианты реализации ключей сеансов при блочном и поточном преобразовании, различные интерфейсы связи с учетом решения задач помехоустойчивого кодирования. При дальнейшем изложении для краткости будем придерживаться термина система.

Если из этого определения выделить только функции преобразования и ключ, то изображение системы можно представить в виде, приведенном на *рисунке 1*. Зависимость между сообщением и ключом двухмерная.

Как показывают результаты анализа, наличие постоянных функций преобразования в системе может быть недостаточным при резком возрастании вычислительных возможностей. Появление и совершенствование супер-ЭВМ, развитие методов параллельных вычислений, перспективы создания квантовых компьютеров ставят под угрозу большинство криптографических систем, а также значительное количество их протоколов. Все это приводит к необходимости создания новых функций и алгоритмов, обеспечивающих надежное рассеивание и перемешивание информации в процессе преобразования. Эти выводы подтверждаются результатами исследований общетеоретической концепции и архитектурных принципов построения распределенных адаптивных систем с функцией

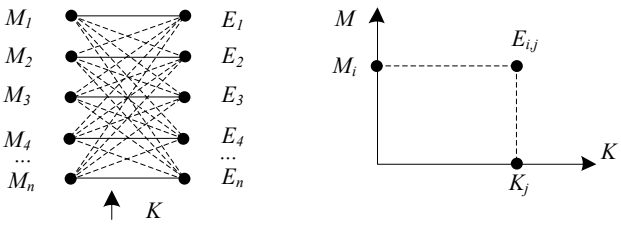



**Рис.1.** Вариант изображения системы

защиты данных [4] и обеспечение подлинности и целостности информации при проведении научных экспериментов [5].

Одним один из направлений увеличения криптографической стойкости информационно-криптографических систем являются методы математической теории поля, с использованием результатов классификации алгебраических структур и преобразований многочленов над конечными полями [6] и введение в систему переменных функций и алгоритмов преобразования подстановок и перестановок ряда факториальных множеств [7-9].

### Теоретико-функциональный анализ функции преобразования

При введении переменных функций преобразования система выражений для криптограммы и сообщения принимает вид.

$$\begin{cases} E = F(M,K) \\ M = F^{-1}(E,K) \\ K \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} E = F_{K_F}(F(M,K_M)\ K_F) \\ M = F_{K_F}^{-1}(F^{-1}(E,K_M)\ K_F). \\ K \to K_M, K_F \end{cases} \quad (5)$$

В качестве левых (исходных) функций преобразования могут выступать любые функции или алгоритмы с постоянными преобразованиями и переменным ключом, например Люцифер, DES, AES, ГОСТ 28.147-89 и т.д. Справа приведена система выражений для криптограммы и сообщения при переменной функции преобразования и переменном ключе. Исходные функции преобразования (при $F_f=const$) можно представить в виде двух математических моделей

$$\text{Å} = \text{F(M,}\text{K} \to \begin{cases} F_1(M,K_{K_1}) \\ F_2(M,K_{K_2}) \\ .... \\ F_f(M,K_{K_f}) \end{cases}, \text{k} = \{1,...,k \ge f\}, f = \{1,2,.\}; \quad (6)$$

$$\text{M} = \text{F}^{-1}\text{(M,}\text{K} \to \begin{cases} F_1^{-1}(E,K_{K_1}) \\ F_2^{-1}(E,K_{K_2}) \\ .... \\ F_f^{-1}(E,K_{K_f}) \end{cases}, \text{k} = \{1,...,k \ge f\}, f = \{1,2,.\}. \quad (7)$$

Представленные модели предполагают применение только одной из приведенных в выражениях (6), (7) функции ($F_1$, $F_2$, … , $F_f$) (по принципу «или-или»). Графическое изображение зависимости криптограммы и сообщения с постоянной функцией, приведено на *рисунке 2*.

Ограничения $M_m=const$, $E_e=const$ введены для простоты представления и наглядности, если зафиксировать только одно из этих значений, то зависимости будут более сложными для восприятия. Реально для анализа лучше фиксировать только сообщение $M$ ($M_m=const$). Для того чтобы левые функции привести к правому виду, можно предложить несколько вариантов.

***Вариант 1.*** Функции можно представить как их взвешенную сумму. Подобный вариант обозначен в работах [1-3]. Он предполагает выбор (коммутирование) функций ($F_1,F_2,\ldots,F_f$) с определенной вероятностью (назовем его вероятностный коммутатор).

***Вариант 2.*** Функции можно представить в виде последовательности функций ($F_1,F_2,\ldots,F_f$) каждая из которых имеет свою независимую ключевую систему. При использовании существующих функций и алгоритмов система может стать слишком громоздкой, примером может служить двойной и тройной DES [2,3].

***Вариант 3.*** В существующие или вновь разрабатываемые функции и алгоритмы встраиваются переменные функции на базе подстановок и перестановок ряда факториальных множеств [8,9]. Этот вариант является новым и, по мнению автора, наиболее предпочтительным.

Ключевая последовательность правых функций преобразования состоит из двух частей: $K \to K_M, K_F, \ldots$, где $K_M$ – ключ сообщения (для фиксированной функции), $K_F$ – ключ функции (для выбора переменной функции или ее параметров). Математические модели данных функций можно представить в следующем виде

$$E = F_{K_F}(F(M,K_M)\ K_F) \to \begin{cases} F_{K_{F1}}(F_1(M,K_{M1})\ K_{f1}) \\ F_{K_{F2}}(F_2(M,K_{M2})\ K_{f2}) \\ F_{K_k}(F_f(M,K_{Mkf})\ K_{fkg}) \end{cases} \quad (8)$$

$$E = F_{K_F}^{-1}(F^{-1}(F^{-1}(E,K_E)\ K_F) \to \begin{cases} F_{K_{F1}}(F_1(E,K_{E1})\ K_{f1}) \\ F_{K_{F2}}(F_2(E,K_{E2})\ K_{f2}) \\ F_{K_k}(F_f(E,K_{Ekf})\ K_{fkg}) \end{cases} \quad (9)$$

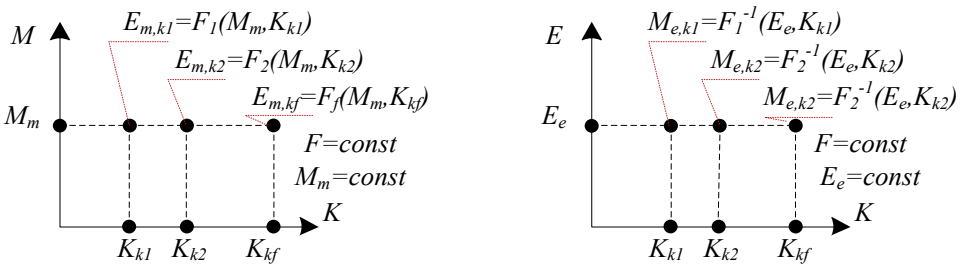



**Рис.2.** Зависимости криптограммы и сообщения

Графическое изображение криптограммы и сообщения системы с переменной функцией и переменным ключом, приведены на *рисунке 3*.

Исходя из вышеизложенного ясно, что условная вероятность $P_м(E)$ криптограммы $E$ при условии, что выбрано сообщение $M$ в выражении необходимого и достаточного условия совершенно стойкости будет зависеть не только от ключа, но и от переменной функции $F$. В этом случае условная вероятность криптограммы $E$ будет соответствовать не только сумме вероятностей всех ключей, которые переводят сообщение $M$ в криптограмму $E$ для каждой функции, но и сумме вероятностей всех функций, переводящих сообщение $M$ в криптограмму $E$ для каждого ключа. Зависимость сообщения и криптограммы становится трехмерной, что существенно влияет на общую теоретическую стойкость системы.

В случае, когда переменным является не только ключ, но и функция преобразования, для учета ее влияния предлагается ввести понятие энтропии переменной функции:

$$\begin{cases} Ð(Ì) = -\sum Ð(Ì)\log P(M) \\ H(K) = -\sum P(K)\log P(K) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} H(M) = -\sum P(M)\log P(M) \\ H(K) = -\sum P(K)\log P(K) \\ H(F) = -\sum P(F)\log P(F) \end{cases} \quad (10)$$

Переменные функции преобразования можно строить на базе одиночных подстановок и перестановок ряда факториальных множеств [8,9]. Кроме того, подстановки и перестановки ряда факториальных множеств образуют симметрические группы, элементы которых некоммутативны, значит любая функция преобразования, представляющая их произведение, будет изменяться в результате перестановки составляющих ее элементов, если даже сами функции являются постоянными.

Любую функцию преобразования можно представить в виде результирующей подстановки для каждого конкретного ключа. Одновременно с этим, какой бы сложной система ни была ее результирующую функцию можно разложить на ряд последовательно выполняемых функций

$$f(x)=f_0(x)\ ,f_1(x),\ f_2(x),\ldots,f_n(x) \quad (11)$$

Каждую из них $f_0(x),\ ,f_1(x),\ f_2(x),\ldots,f_n(x)$, включая результирующую, также можно представить в виде конкретной подстановки

$$S(x)=S_0(x)\ ,S_1(x),\ S_2(x),\ldots,S_n(x), \quad (12)$$

или последовательного произведения составляющих ее подстановок

$$S(x)=S_0(x)\ ,S_1(x),\ S_2(x),\ldots,S_n(x). \quad (13)$$

Эти результаты справедливы и для перестановок, и для комбинации подстановок и перестановок.

### Заключение

В информационно-криптографических системах предполагается, что функции преобразования априорно известны и в процессе работы изменяется только ключи. Одним один из вариантов увеличения криптографической стойкости системы в условиях возрастания вычислительных возможностей злоумышленников является введение в нее переменных функций. В этом случае в процессе преобразования можно будет изменять не только ключи, но и функции, что существенным образом осложнит задачу злоумышленника, т.к. зависимость сообщения и криптограммы становится трехмерной, что существенно влияет на общую теоретическую стойкость системы, особенно если процесс смены функций будет стохастическим.

### Литература

1. Shannon C. Communication theory of secret system// Bell System Techn. J. 28/1949. № 4. Pp. 656-715.

2. Алферов А.П., Зубов А.Ю., Кузьмин А.С., Черемушкин А.В. Основы криптографии: учебное пособие. М.: Гелиос АРН, 2001. 480 с., ил.

3. Грибунин В.Г., Костюков В.Е., Мартынов А.П., Николаев Д.Б., Фомченко В.Н. Современные методы обеспечения безопасности в атомной энергетике: Монография / под ред. А.И.

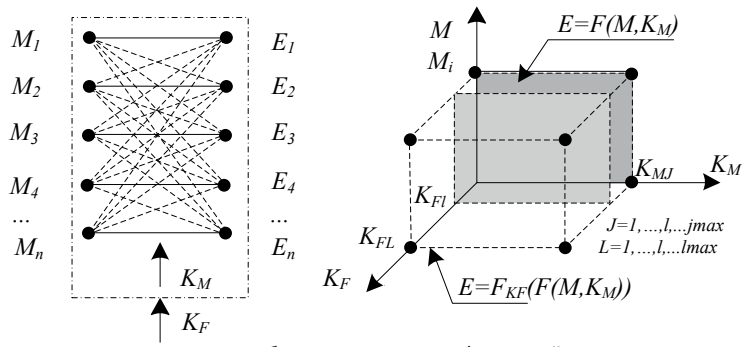



**Рис.3.** Зависимость криптограммы и сообщения криптографической системы с переменной функцией и переменным ключом

Астайкина. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014. 636 с., ил.
4. Мартынова И.А. Защита информации. Исследование общетеоретической концепции и архитектурных принципов построения распределенных адаптивных систем с функцией защиты данных: учебное пособие /И.А. Мартынова, С.В. Смуров, П.В. Воронов, И.А. Николаева. Серпухов: ФВА РВСН имени Петра Великого, 2017. 176 с.
5. Мартынова И.А. Обеспечение подлинности и целостности информации при проведении научных экспериментов: учебное пособие / И.А. Мартынова, С.В. Смуров, П.В. Воронов, И.А. Николаева. Серпухов: ФВА РВСН имени Петра Великого, 2016. 226 с.
6. Мартынова И.А., Машин И.Г., Фомченко В.Н. Теория поля и защита информации: монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. 209 с.
7. Мартынова И.А., Мартынов А.П., Николаев Д.Б. Криптографические системы и метод факториального сжатия информации// Известия Института инженерной физики», 2016. №4(42). С.54-58.
8. Мартынова И.А., Мартынов А.П. Функции перестановки в системе счисления ряда факториальных множеств// Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2016. №3. С.42-49.
9. Мартынова И.А., Мартынов А.П., Фомченко В.Н. Аксиоматические основы функций подстановки в системе счисления ряда факториальных множеств и их характеристики: монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. 210 с.: ил.

УДК 303.732.4

# СООТВЕТСТВИЯ, ОТОБРАЖЕНИЯ И ОБРАЗЫ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

# MATCHES, DISPLAYS, AND IMAGES OF INFORMATION SYSTEM ELEMENTS

Александр Петрович Мартынов
*доктор технических наук, профессор*
начальник отдела
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Адрес: 607190, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, д. 37
Тел.: 8 (83130) 2-34-04
E-mail: staff@vniief.ru

Дмитрий Борисович Николаев
*доктор технических наук, доцент*
ведущий научный сотрудник
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Адрес: 607190, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37
Тел. 8(83130)2-34-04
E-mail: staff@vniief.ru

Инна Александровна Мартынова
*кандидат физико-математических наук*
научный сотрудник
ФГБУН «ОИВТ РАН»
Адрес: 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр.2
Тел.: 8 (495) 485-8345
E-mail: amirovravil@yandex.ru

Денис Валерьевич Сплюхин
научный сотрудник
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Адрес: 607190, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, д. 37
Тел.: 8 (83130) 2-34-04
E-mail: staff@vniief.ru

**Аннотация**

Процесс передачи информации между двумя объектами информационной системы можно представить как отображение элементов множества *A* в элементы множества *B* или как установление соответствия между элементами этих множеств. Факториальное множество – это упорядоченное множество, представляющее из себя матрицу (размерностью *n*×*m*), столбцами которой являются *n* – образующих элементов множества, а строками – *m* – перестановок образующих элементов множества. $Ф_n$ – обозначение факториального множества, где Ф – собственно факториальное множество, а *n* – его порядок (номер), равный числу образующих его элементов факториального множества. Образующие элементы факториального множества являются его областью определения и обозначены цифрами, а область значений обозначена, но не определена. Так как работы по изучению и анализу факториальных множеств подстановок и симметрических групп подстановок находятся в самом начале, предлагается для расширения функциональных возможностей исследователей при их описании ввести некоторые дополнения и уточнения.

**Ключевые слова:** соответствия, отображения, образы, факториальная система счисления, факториальное множество, порядок множества, образующие элементы, область определения, область значения, инъективность, сюръективность, биективность, биективное отображение.

**Summary**

The process of transferring information between two objects of an information system can be represented as a mapping of elements of the set *A* to elements of the set *B* or as establishing correspondence between the elements of these sets. A factorial set is an ordered set, which is a matrix (dimension *n*×*m*), the columns of which are *n*-forming elements of the set, and the rows are *m* - permutations of the forming elements of the set. $Ф_n$ is the designation of a factorial set, where Ф is the actual factorial set, and *n* is its order (number), equal to the number of elements of the factorial set forming it. The generating elements of the factorial set are its domain of definition and are indicated by numbers, and the domain of values is indicated, but not defined. Since the work on the study and analysis of factorial permutation sets and symmetric permutation groups is at the very beginning, it is proposed to introduce some additions and refinements to expand the functionality of researchers when describing them.

**Keywords:** correspondences, mappings, images, factorial number system, factorial set, order of a set, forming elements, domain of definition, domain of value, injectivity, surjectivity, bijectivity, bijective mapping.

Процесс передачи информации между двумя объектами информационной системы можно представить как отображение элементов множества *A* в элементы множества *B* или как установление соответствия между элементами этих множеств.

Если *A* и *B* – произвольные множества, то символ *(a,b)* в алгебре называется *парой*, где $a \in A$ и $b \in B$. Пары *(a,b)* и *(a', b')* считаются равными, если $a=a'$ и $b=b'$. Множество всех пар $\{(a,b) | a \in A, b \in B\}$ – образует прямое (декартово) произве-

дение множеств $A$ и $B$, которое обозначается как $A*B$. Примеры пар и прямое (декартово) произведение множеств $A$ и $B$ приведены на *рисунке 1*.

Если $A_1$, $A_2$, …, $A_n$ – любой конечный набор множеств, то выражение $(a_{i,1},a_{i,2},\ldots,a_{i,n})$, где $a_i \in A_i$ называется последовательностью, строкой или кортежем длины $n$ *(рисунок 2)*. Множество таких последовательностей (строк, кортежей) образуют прямое произведение множеств $A_1,A_2,\ldots,A_n$ и обозначается как $A_1*A_2*\ldots*A_n$.

Рассмотрим некоторые общие понятия имеющие отношение к соответствию $\rho$ между элементами множеств $A$ и $B$ [1,2,3,4]. Подмножество $\rho$ множества $A*B$ в алгебре называется *соответствием* (или бинарным отношением $\rho \subseteq A*B$ между множествами $A$ и $B$. Выражение $(a,b)\in\rho$ означает, что элемент $a$ находится в отношении $\rho$ с элементом $b$, при этом вместо выражения $(a,b)\in\rho$ иногда пишут $a\rho b$ или $\rho(a,b)$.

Если $A$ и $B$ – конечные множества, например, $A=\{1,2,\ldots,n\}$ и $B=\{1,2,\ldots,m\}$, то каждому соответствию $\rho$ между множествами $A$ и $B$ можно сопоставить матрицу размером $n\times m$, в которой на пересечении $i$-й строки и $j$-го столбца стоит 1, если $(i,j)\in\rho$, и 0 если $(i,j)\notin\rho$.

Если множества $A$ и $B$ представить как множества точек на плоскости и соединить элементы $i$ и $j$ стрелкой (если $(i,j)\in\rho$), то получится направленный граф. В этом случае соответствие $\rho$ однозначно восстанавливается как по своей матрице, так и по своему направленному графу.

Варианты восстановления соответствий по матрице и по графу приведено на *рисунке 3*.

Если $\rho$ – соответствие между множествами $A$ и $B$, то $\rho^{-1}$ соответствие между множествами $B$ и $A$, определяемое условием

$$\rho^{-1}=\{(b,a)\,|\,(a,b)\in\rho\}. \qquad (1)$$

Обратная матрица соответствия $\rho^{-1}$ получается из матрицы соответствия $\rho$ транспонированием (при транспонировании матрицы ее строки и столбцы меняются местами).

Область определения соответствия $\rho$ это множество

$$Dom\,\rho = \{a\,|\,a\in A,\,(a,b)\in\rho \text{ для некоторого } b\in B\}, \qquad (2)$$

а образ или область значений – множество

$$Im\,\rho = \{b\,|\,b\in B,\,(a,b)\in\rho \text{ для некоторого } a\in A\}. \qquad (3)$$

В работах [5,6,7] отмечено, что подстановки полностью задаются областью определения и функцией, а наличие ее области значений только подразумевается, т.к. она полностью определяется функцией, но иногда, как в нашем случае, удобнее пользоваться не функцией, а областью значений для соответствий.

Из выше сказанного следует, что

$$\begin{cases} \mathrm{Dom}\,\rho = \mathrm{Im}\,\rho^{-1} \\ \mathrm{Dom}\,\rho^{-1} = \mathrm{Im}\,\rho \end{cases}. \qquad (4)$$

Если $Dom\,\rho = A$, то соответствие везде определено. Везде определенное соответствие иногда называют многозначным отображением.

Если $a\in A$ то множество

$$\rho(a) = \{b\,|\,b\in B,\,(a,b)\in\rho\} \qquad (5)$$

является *образом элемента* $a$ при соответствии $\rho$. Образы элементов в общем виде подробно рассмотрены в работах [1,4], а применительно к подстановкам ряда факториальных множеств в работе [8].

Если $X\subset A$, то множество $\rho(X)=U\{\rho(x)\,|\,x\in X\}$ является *образом множества* $X$ при соответствии $\rho$, или сечением соответствия $\rho$ по множеству $X$. Сечение соответствия $\rho$ по одноэлементному множеству $\{x\}$ совпадает с образом элемента $x$.

Если $b\in B$, то множество $\rho^{-1}(b)=\{a\,|\,a\in A,(a,b)\in\rho\}$ является прообразом элемента $b$ при соответствии $\rho$. Этот прообраз совпадает с образом элемента $b$ при соответствии $\rho^{-1}$.

Прообраз множества $Y\subseteq B$ определяется равенством $\rho^{-1}(Y)=U\{\rho^{-1}(y)\,|\,y\in Y\}$ и совпадает с образом множества $Y$ при соответствии $\rho^{-1}$.

Соответствие $\rho\,|\,x=\rho\cap(X*B)=\{(x,b)\,|\,x\in X,(x,b)\in\rho\}$ является ограничением (или сужением) соответствия $\rho$ на подмножество $X$ при $Y\subseteq A$.

Понимание этих, очевидных на первый взгляд, понятий является очень важным для

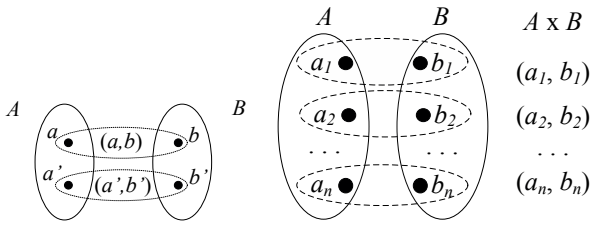



**Рис.1.** Примеры пар и прямое (декартово) произведение множеств A и B

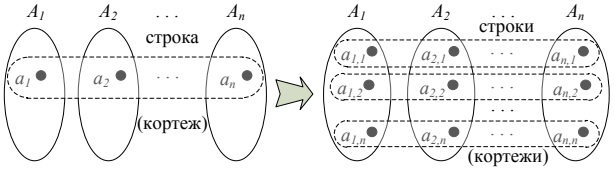



**Рис.2.** Строки (кортежи) конечного набора множеств

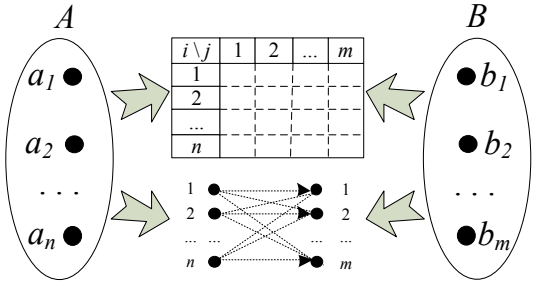



**Рис.3.** Восстановление соответствий по матрице и по графу

информационных и криптографических систем, особенно для функций подстановки и перестановки в криптографических алгоритмах при их анализе в системе счисления ряда факториальных множеств [8,9]. Проиллюстрируем приведенные понятия на примерах.

***Пример 1.*** Рассмотрим множества $A$ и $B$ и подмножество $\rho$:

$A = \{a_1, a_2, a_3,\}$, $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$,

$\rho = \{(a_1, b_1), (a_1, b_2), (a_1, b_3), (a_2, b_1), (a_3, b_4), \}$.

Для них матрица соответствия равна

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

ее граф соответствия приведен на *рисунке 4*.

***Пример 2***. Рассмотрим множества $A$ и $B$ и подмножество $\rho$:

$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$,

$\rho = \{(a_1, b_1), (a_1, b_2), (a_1, b_3), (a_1, b_5), (a_2, b_1), (a_3, b_4), (a_4, b_3), (a_4, b_5)\}$.

Для них матрица соответствия равна

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{matrix},$$

ее граф соответствия приведен на *рисунке 5*.

***Пример 3.*** Рассмотрим множества $A$ и $B$ и подмножество $\rho$:

$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$, $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$,

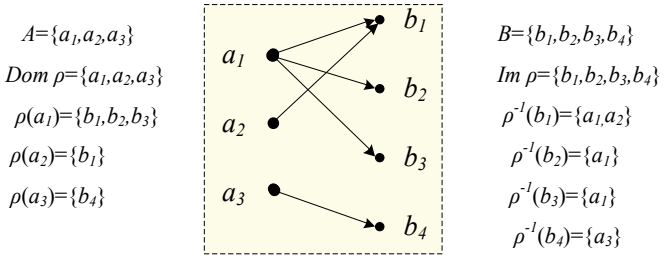
$\rho = \{(a_1, b_1), (a_1, b_2), (a_2, b_1), (a_3, b_1), (a_3, b_4), (a_4, b_3), (a_4, b_4), (a_5, b_1)\}$.

Для них матрица соответствия равна

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{matrix},$$

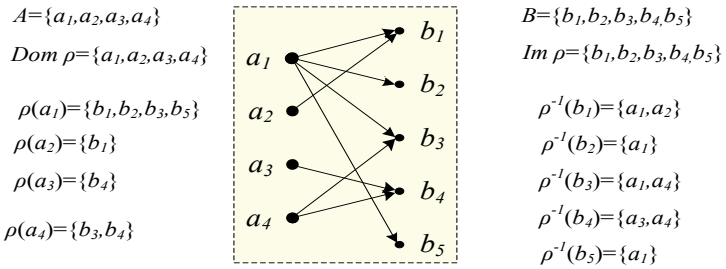
ее граф соответствия приведен на *рисунке 6*.

Обобщая приведенные результаты, можно отметить, что множества $A$ и $B$, в общем случае, могут иметь разную мощность (A>B, A=B, A<B), при этом, каждому элементу множества $A$ может



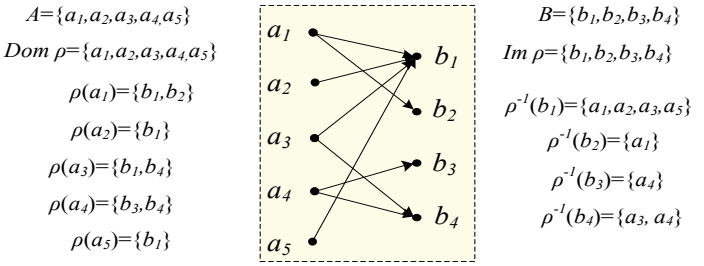

$\rho=\{(a_1,b_1), (a_1,b_2),(a_1,b_3),(a_2,b_1),(a_3,b_4)\}$.

**Рис.4.** Граф матрицы соответствия ***примера 1***




$\rho=\{(a_1,b_1), (a_1,b_2),(a_1,b_3),(a_1,b_5),(a_2,b_1),(a_3,b_4),(a_4,b_3),(a_4,b_4)\}$.

**Рис.5.** Граф матрицы соответствия ***примера 2***




$\rho=\{(a_1,b_1), (a_1,b_2),(a_2,b_1),(a_3,b_1),(a_3,b_4),(a_4,b_3),(a_4,b_4),(a_5,b_1)\}$.

**Рис.6.** Граф матрицы соответствия ***примера 3***

соответствовать от 0 до $n$ элементов множества $B$ и наоборот, каждому элементу множества $B$ может соответствовать от 0 до $n$ элементов множества $A$ и наоборот.

Переходя на терминологию образов элементов [8], можно отметить, то каждый образ элемента множества может иметь от 0 до $n$ прообразов, а каждый прообраз элемента множества может соответствовать от 0 до $n$ образам.

Рассмотрим теперь полные отражения. Соответствие называется *полным отображением*, если оно совпадает с $A*B$, т.е. состоит из всех пар $(a, b)$. Все элементы матрицы, соответствующей полному соответствию, равны 1. Если $\rho$ – полное соответствие, то соответствие $\rho^{-1}$ также полно.

Примером полного соответствия являются симметрические группы подстановок $G_n(S)$ ряда факториальных множеств $\Phi_n$ [8]. Для подстановок мощности множеств $A$ и $B$ равны. Рассмотрим матрицу соответствия факториального множества $\Phi_4$:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Граф полного отображение матрицы соответствия факториального множества $\Phi_4$ [8] приведен на *рисунке 7*.

Соответствие $\rho$ называется *частичным отображением* множества $A$ на множество $B$, если для каждого $a \epsilon Dom\ \rho$ множество $\rho(a)$ является одноэлементным. Примером частичного соответствия, для которого множество $\rho(a_i)$ является одноэлементным может служить любая конкретная подстановка $S_{n,m}$ симметрической группы подстановок $G_n(S)$ ряда факториальных множеств $\Phi_n$, где $n$ – номер факториального множества и порядок группы, $m$ – номер подстановки, например подстановка $S_{4,2}$.

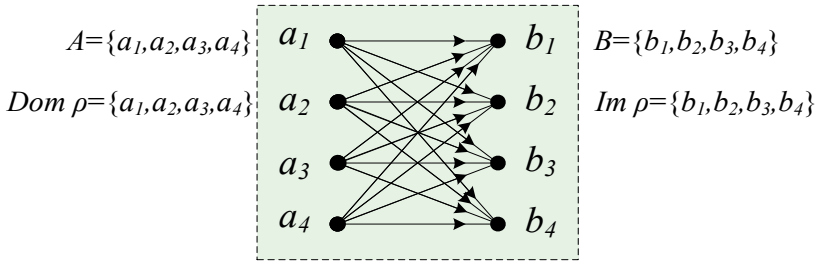
Матрица соответствия подстановки $S_{4,2}$ факториального множества $\Phi_4$:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Граф отображение матрицы соответствия подстановки $S_{4,2}$ факториального множества $\Phi_4$ [7] приведен на *рисунке 8*.

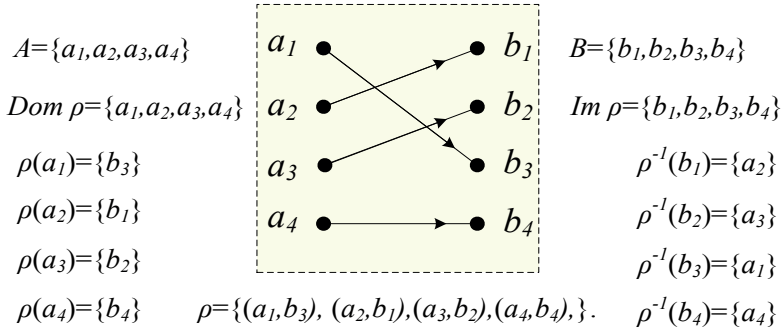
В соответствии с определением равенства [4] соответствий частичные отображения $\rho$ и $\sigma$ из $A$ в $B$ равны тогда и только тогда, когда $Dom\ \rho = Dom\ \sigma$ и $\rho(x) = \sigma(x)$ для всех $x \epsilon Dom\ \rho$. Имея частичное отображение мы каждому элементу из $Dom\ \rho$ можем поставить в соответствие однозначно определенный элемент из $B$.

Отображением множества $A$ на множество $B$ называется такое частичное отображение $\rho$ из $A$ в $B$, что $Dom\ \rho = A$. В этом случае каждому элементу из $A$ ставится в соответствие однозначно определенный элемент из $B$. На частично отображение $\rho$ из $A$ в $B$ можно смотреть как на полное отобра-




$\rho=\{(a_1,b_1),(a_1,b_2),(a_1,b_3),(a_1,b_4),\ (a_2,b_1),(a_2,b_2),(a_2,b_3),(a_2,b_4),$
$(a_3,b_1),(a_3,b_2),(a_3,b_3),(a_3,b_4),\ (a_4,b_1),(a_4,b_2),(a_4,b_3),(a_4,b_4),\}.$

**Рис.7.** Граф полного отображения матрицы соответствия факториального множества $\Phi_4$




$\rho=\{(a_1,b_3),\ (a_2,b_1),(a_3,b_2),(a_4,b_4),\}.$

**Рис.8.** Граф отображения матрицы соответствия подстановки $S_{4,2}$

жение из *Dom* $\rho$ в $B$. Выражение $\varphi:A\to B$ означает, что $\varphi$ является отображением множества $A$ в $B$. Согласно определению равенства соответствий отображения $\varphi: A\to B$ и $\omega: C\to D$ и $\varphi(x) = \omega(x)$ для всех $x\in A$.

Как и было отмечено ранее, если $a\in A$, то элемент $\varphi(a)$ называется образом элемента $a$. При этом, отображение $\varphi$ ставит в соответствие элементу $a$ элемент $\varphi(a)$. Прообразом элемента $b$ из $B$ при отображении $\varphi$ называется такой элемент $a\in A$, что $\varphi(a)=b$, а полным образом элемента $b$ – множество всех его прообразов. Полный прообраз элемента может оказаться пустым.

В частности, образ $\varphi(X)$ подмножества $X \subseteq A$ определяется равенством

$$\varphi(X) = \{\varphi(x) \mid x \in X\},$$

а полный прообраз $\varphi^{-1}(Y)$ подмножества $Y \subseteq B$ – равенством

$$\varphi^{-1}(Y) = \{x \mid x \in A, \varphi(x) \in Y\}.$$

Множество $\varphi(A)$ называется прообразом отображения $\varphi$ и обозначается как *lm* $\varphi$.

В работе [4] рассмотрены вопросы сужения и расширения отображений. В частности, если $A'$ – подмножество множества $A$ и $\varphi:A\to B$, то про отображение $\varphi':A'\to B$, где $\varphi'(x)=\varphi(x)$ для всех $x\in A'$, говорят, что оно является сужением или ограничением отображения $\varphi$ на $A'$.

В этом случае пишется $\varphi'=\varphi|_A$, а про отображение $\varphi$ говорят, что оно является продолжением или расширением отображения $\varphi'$. Заметим, однако, что нельзя сказать, что $\varphi=\varphi'$, поскольку у них разные области определения.

Отображение $\varphi:A\to B$ называется постоянным или константой, если найдется такой элемент $b\in B$, что $\varphi(a)=b$ для всех $x\in A$.

Отображение $1_A:A\to A$, где $1_A(x)=x$ для всех $x\in A$, называется тождественным (вместо $1_A$ в алгебре употребляется также выражение $id_A$).

В соответствии с [4] отображение $\varphi:A\to B$ называется *вложением* или *инъективным отображением*, если для любых $a',a''\in A$ равенство $\varphi(a') = \varphi(a'')$ влечет за собой $a'=a$. Другими словами, при вложении различные элементы множества $A$ переходят в различные элементы множества $B$. Если $A$ подмножество множества $B$, то вложение $\varphi:A\to B$, где $\varphi(x)=x$ для всех $x\in A$, называется *каноническим* или *естественным*. Каноническое вложение подмножества $A$ в $B$ совпадает с ограничением отображения $1_в$ на подмножество $A$.

Отображение $\varphi:A\to B$ называется *наложением* или *сюръективным отображением* (говорят также, что отображает $A$ на $B$), если для всякого $b \in B$ найдется такой элемент $a \in A$, что $\varphi(a')=b$.

Другими словами, при наложении каждый элемент из $B$ имеет хотя бы один прообраз.

Отображение, являющееся одновременно вложением и наложением, называется *взаимно однозначным* или *биективным*.

Исходя из выше сказанного, можно сделать следующий вывод:

Все подстановки $S_{n,m}$ факториальных множеств $\Phi_n$ (где $n$ – номер факториального множества, а $m$ – номер подстановки в данного факториального множества) являются *взаимно однозначными* или *биективными отображениями*.

Про взаимно однозначные отображения говорят, что они устанавливают взаимно однозначное соответствие между элементами множеств $A$ и $B$, то есть между областью определения и область значений подстановок.

Для отображения конечного множества в себя инъективность, сюръективность и биективность – равносильные условия.

В работе «Аксиоматические основы подстановок ряда факториальных множеств» [8] введено определение ряда факториальных множеств.

Факториальное множество – это упорядоченное множество, представляющее из себя матрицу (размерностью $n\times m$), столбцами которой являются $n$ – образующих элементов множества, а строками – $m$ – перестановок образующих элементов множества. $\Phi_n$ – обозначение факториального множества, где $\Phi$ – собственно факториальное множество, а $n$ – его порядок (номер), равный числу образующих его элементов факториального множества. В соответствии с этим определением все подстановки факториального множества $\Phi 4$ можно представить графом полного отображения матрицы, приведенном на *рисунке 3*, а конкретную подстановку, входящую в состав данного факториального множества $(S_{4,2})$ () графом отображения матрицы, приведенном на *рисунке 4*.

Образующие элементы факториального множества являются его областью определения и обозначены в работе [8] цифрами, а область значений обозначена, но не определена. Так как работы по изучению и анализу факториальных множеств подстановок и симметрических групп подстановок находятся в самом начале, предлагается для расширения функциональных возможностей исследователей при их описании ввести некоторые дополнения и уточнения. Для этого обратимся к *рисунку 3*. А именно:

1) множество образующих элементов факториальных множеств подстановок $\Phi_n$ соответствует множеству входных элементов $A$, их предлагается обозначать не цифрами $(1,2,3,\ldots,n)$, а буквами с соответствующими индексами $(a_1,a_2,a_3,\ldots,a_n)$;

2) множество выходных элементов $B$ подстановок факториальных множеств также предлага-

ется обозначать не цифрами *(1,2,3,…,n)*, а буквами и соответствующими индексами $(b_1,b_2,b_3,\ldots,b_n)$.

В этом случае будут справедливы следующие обозначения:

$A=\{a_1,a_2,a_3,\ldots,a_n\}$ – множество входных элементов подстановок факториальных множеств $\Phi_n$, соответствующее множеству образующих элементов подстановок.

$B=\{b_1,b_2,b_3,\ldots,b_n\}$ – множеству выходных элементов подстановок факториальных множеств $\Phi_n$.

$Dom\ \rho=\{a_1,a_2,a_3,\ldots,a_n\}$ – область определения подстановок факториальных множеств $\Phi_n$.

$Im\ \rho=\{b_1,b_2,b_3,\ldots,b_n\}$ – область значений подстановок факториальных множеств $\Phi_n$.

Введенные обозначения для подстановок факториальных множеств отражены на *рисунке 9*.

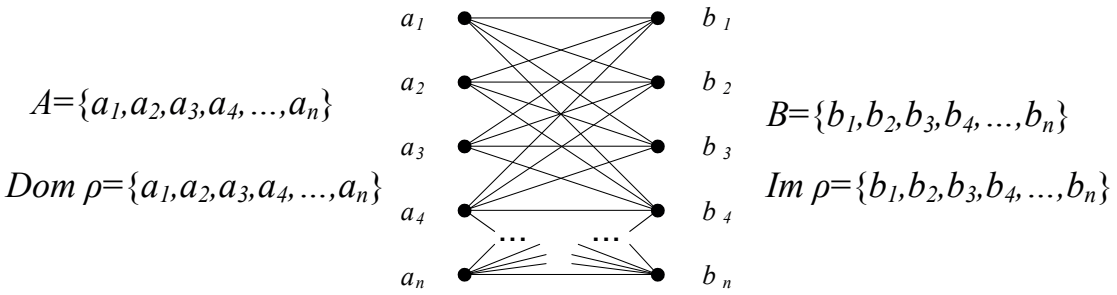



**Рис.9.** Обозначения для подстановок факториальных множеств

**Литература**

1. Ван-дер-Варден Б.Л. Алгебра. М.: Мир, 1976. 648 с.

2. Мартынова И.А., Машин И.Г., Фомченко В.Н. Монография. Введение в теорию поля и ее приложения. Саров: ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ, 2014. 108 с.

3. Мартынова И.А., Машин И.Г., Фомченко В.Н. Теория поля и защита информации: монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. 209 с.: ил.

4. Общая алгебра. Т. 1 / О.В. Мельников, В.Н. Ремесленников, В.А. Романьков и др. Под общ. ред. Л.А. Скорнякова. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 592 с. (Справ. мат. б-ка).

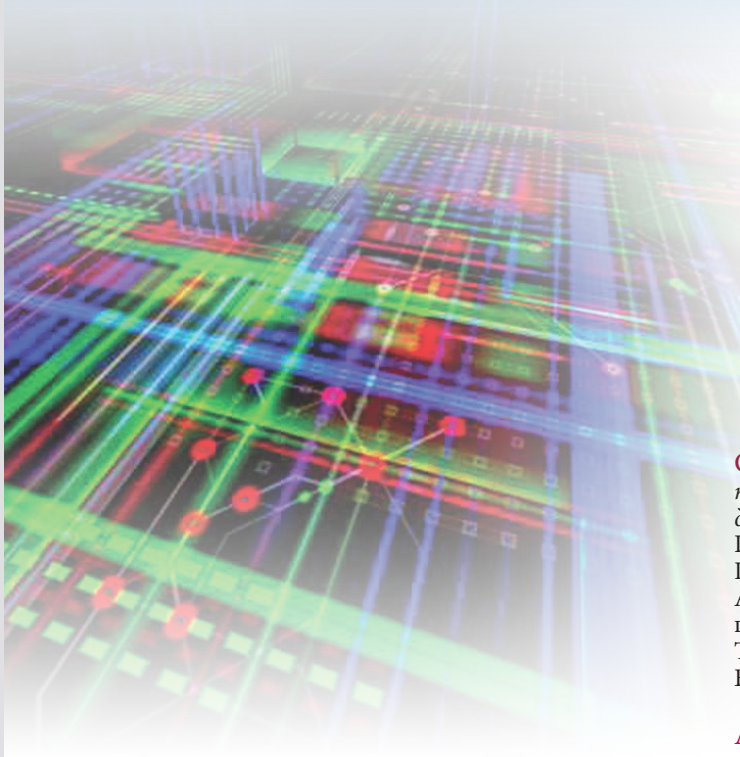
5. Фрид Э. Элементарное введение в абстрактную алгебру. Перевод с венгерского Ю.А. Данилова. М.: Мир, 1979. 260 с. с ил.

6. Мартынов А.П., Мартынова И.А. Подстановки, их свойства и характеристики. Учебное пособие. Саров. СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2018. 55 с.: ил.

7. Астапенко Ю.В., Мартынова И.А., Николаева И.А. Криптографические системы и функции подстановки: учебное пособие. Серпухов: ФВА РВСН имени Петра Великого, 2019. 62 с.

8. Мартынов А.П., Мартынова И.А., Фомченко В.Н. Аксиоматические основы функций подстановки в системе счисления ряда факториальных множеств и их характеристики: монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. 210 с.: ил.

9. Мартынов А.П., Мартынова И.А. Функции перестановки в системе счисления ряда факториальных множеств// Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2016. № 3. С.42-49.



УДК 539.182

# МНОГОМЕРНЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ПРОЕКТИВНЫЕ ПРОСТРАНСТВА В КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ И КВАНТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

# MULTI–DIMENSIONAL COMPLEX PROJECTIVE SPACES IN QUANTUM PHYSICS AND QUANTUM INFORMATION

Сергей Владимирович Смуров
*почетный работник науки и техники РФ*
*доктор технических наук, профессор*
Первый Вице-президент Института –
Главный конструктор
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: Svs_iif@mail.ru

Алексей Николаевич Царьков
*заслуженный деятель науки РФ*
*доктор технических наук, профессор*
Президент Института –
Председатель Правления Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210 Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967) 35-31-93
E-mail: info@iifmail.ru

Геннадий Германович Волков
*доктор физико-математических наук, профессор*
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

**Аннотация**

Природу глобального квантового запутывания многокубитовых, кутритовых и выше многомерных квантовых состояний с осуществлением дальнейшей глобальной квантовой телепортации очень важно исследовать в рамках комплексной многомерной проективной геометрии, Келеровых и Калаби-Яу многообразий. Эти многомерные проективные многообразия исследуются на базе методов современной дифференциальной геометрии, ториковой и алгебраической геометрий. В этой статье мы сделаем начальный краткий экскурс в комплексные проективные пространства, в Келеровы и Калаби-Яу многообразия, классификация которых построена на алгебре проективных рефлексивных чисел, базирующейся на много операционных законах композиции элементов алгебры. Геометрический подход является основным базисом проникновения исследователем в различные пути управления многокудитовыми квантовыми состояниями.

**Ключевые слова:** комплексная проективная геометрия кудитов, касательные и кокасательные расслоения, голоморфные расслоения, дифференциальные формы, проективные многообразия, Келеровы многообразия, Калаби-Яу пространства, алгебраические многообразия, торическая геометрия, алгебра проективных рефлексивных чисел.

**Summary**

The nature of the global quantum entanglement of multi-qubit, qutrite and higher multidimensional quantum states with the implementation of further global quantum teleportation is very important to investigate within the framework of complex multidimensional projective geometry, Kähler and Calabi-Yau manifolds. These multidimensional projective varieties are investigated on the basis of the methods of modern differential geometry, toric and algebraic geometries. In this article, we will make an initial brief excursion into complex Kähler and Calabi-Yau manifolds, the classification of which is based on the algebra of projective reflexive numbers, based on multioperational operations of the composition laws of algebra elements. The geometric approach is the main basis for the researcher's penetration into various ways of managing multi-qudite quantum states.

**Keywords:** complex projective geometry of qudits, tangent and cotangent bundles ,holomorhic fiber bundles, differential forms, Kähler manifolds, Calabi-Yau spaces, algebraic varieties , toric geometry, algebra of projective reflexive numbers.

### Введение

Пути обобщения всей квантовой науки могут быть связаны с расширениями поля комплексных чисел – базиса всей квантовой науки [1-3]. С этим связаны поиски новых алгебр и симметрий, которые позволили бы проникнуть в многомерную геометрию как пространства-времени за космическими пределами 4-х мерной специальной теории относительности, так и квантовых многомерных запутанных состояний [1-3].

Многомерная геометрия представляет такие же трудности для нашего сознания, как и наши попытки проникновения в квантовый микромир. В этом есть полная аналогия между бесконечно маленьким и бесконечно большим и неизвестно, что труднее… Мы проделаем краткий путь от комплексных многообразий к Калаби-Яу многообразиям через джунгли келеровских многообразий и остановимся на так называемой ториковой геометрии, которая позволяет продвинуться в глубины проективных многообразий и алгебраических многообразий [3-9]. Все это завязано на запутывание многих кубитов, кутритов и выше... Как мы уже писали в наших статьях, идет скрещивание проблем физики высоких энергий и квантовой информации – квантовые состояния – многомерны [1-3].

В современных теориях квантовой физики и квантовой информации возник особый интерес к комплексным проективным многообразиям, к многообразиям Келера и Калаби-Яу, размерности 2,4,6, которые изучаются в теориях расслоений. Расслоения и фибры позволяют раскрыть топологическую и геометрическую информацию о тех многообразиях и пространствах , над которыми они определены. Теория Янга - Миллса определена на пространстве связностей главного расслоения над римановыми многообразиями. Такие структуры, как ориентация, комплексная структура, спиновая структура, риманова метрика – все определяются на касательном расслоении многообразия [4-9].

В последнее время торическая геометрия стала важной частью геометрических исследований, так торические многообразия дают элементарный способ понять многие свойства гиперповерхностей Келера, Калаби-Яу, используя их зеркальную симметрию и соответствующие им рефлексивные многогранники [5].

### Келеровы многообразия

На комплексных многообразиях $M$ расширение вещественной метрики на комплексные координаты происходит следующим образом:

$$g_{jk} = g(\frac{\partial}{\partial z^j}, \frac{\partial}{\partial z^k}), g_{j\bar{k}} = g(\frac{\partial}{\partial z^j}, \frac{\partial}{\partial \bar{z}^{\bar{k}}}),$$

$$g_{\bar{j}k} = g(\frac{\partial}{\partial \bar{z}^{\bar{j}}}, \frac{\partial}{\partial z^k}), g_{\bar{j}\bar{k}} = g(\frac{\partial}{\partial \bar{z}^{\bar{j}}}, \frac{\partial}{\partial \bar{z}^{\bar{k}}})$$

с соответствующими свойствами вещественности и симметрии:

$$g_{jk} = g_{kj}, g_{j\bar{k}} = g_{\bar{k}j}, \bar{g}_{jk} = g_{\bar{j}\bar{k}}, \bar{g}_{j\bar{k}} = g_{\bar{j}k}$$

Естественным представляется рассматривать комплексные эрмитовы многообразия M [4], которые допускают метрику в следующей форме: $g(u,v)=g(Ju, Jv)$, где $u$, $v$ – векторные поля на многообразии $M$, а $J$ – комплексная структура. Мягко говоря, $J$ является обобщением обычного умножения на $\pm i$ в теории комплексных чисел, $J^a{}_b J^b{}_c = -\delta^a{}_c$, которое придает каждому касательному пространству $T_xM$ в точке $x$ в $M$ структуру комплексного векторного пространства. Гладкое тензорное поле $J^a{}_b$ как отображение эндоморфизм на касательном пространстве $J: T_xM \otimes C \to T_xM \otimes C$ при действии дважды на векторное поле $u \in \Gamma(TM)$ приводит к следующему равенству $J(Ju)=-u$, то есть $J^2=-1$ [4,6-9]. Вещественное 2n-мерное многообразие M с почти комплексной структурой J является почти комплексным многообразием. Для того, чтобы оно стало действительно комплексным, необходимо, чтобы тензорное поле $N(ienhuis)$ было равно нулю, то есть $N \equiv 0$.

В локальных координатах метрика g на комплексном многообразии будет эрмитова, если

$$g_{\mu\nu} = g_{\bar{\mu}\bar{\nu}} = 0, (g_{\mu\bar{\nu}} = \bar{g}_{\nu\bar{\mu}})$$

и ее можно представить в следующем виде:

$$g = g_{\mu\bar{\nu}} dz^\mu \otimes d\bar{z}^{\bar{\nu}} + g_{\bar{\mu}\nu} d\bar{z}^{\bar{\mu}} \otimes dz^\nu .$$

Заметим, что комплексифицированное касательное пространство $T_xM \otimes C$, является комплексным векторным пространством, изоморфным $C^{2n}$. Так как $J^2=-1$, собственные значения $J$ в $T_xM \otimes C$ равны $\pm i$, то комплексное касательное пространство можно разложить в следующем виде

$$T_xM \otimes C = T_x^{(1,0)}M \oplus T_x^{(0,1)}M,$$

где $T_x^{(1,0)}M$ и $T_x^{(0,1)}M$ – собственные подпространства $J$ с собственным значением $i$ и $-i$ изоморфных $C^n$ и комплексно сопряженных друг с другом.

Так как это разложение справедливо для любой точки $x \in M$, то его можно продолжить до полного комплексифицированного касательного расслоения $T_CM$ и представить в виде разложения на голоморфное $T^{(1,0)}M$ и антиголоморфное $T^{(0,1)}M$ касательные расслоения, то есть

$$T_CM = T^{(1,0)}M \oplus T^{(0,1)}M,$$

сечениями которого являются векторные поля. Разложение на голоморфные и антиголоморфные части справедливо и для комплексифицированного ко-касательного расслоения:

$$T^*_CM = T^{*(1,0)}M \oplus T^{*(0,1)}M$$

с сечениями в виде дифференциальных форм $\omega \in \Gamma(T^*M)$ [4,6-9]. Дифференциальные r-формы

$$\omega^{r=p+q} = \omega_{i_1 \ldots i_p \bar{j}_1 \ldots \bar{j}_q} dz^{i_1} \Lambda \ldots \Lambda dz^{i_p} \Lambda d\bar{z}^{\bar{j}_1} \Lambda \ldots \Lambda d\bar{z}^{\bar{j}_q}$$

образуют пространство антисимметричных тензоров с $p$-голоморфными и $q$-анти-голоморфными индексами

$$\Lambda^r T^*M = \Lambda^p T^{*(1,0)} M \otimes \Lambda^q T^{*(0,1)} M,\ r=p+q,$$

которое является антисимметризованным $r$-образным тензорным произведением с внешним умножением $\Lambda$, определяющим соответственно эти формы в виде полностью антисимметричных тензорных полей, и внешним дифференцированием $d\omega^r \to \omega^{r+1}$,

$$d\omega^{p,q} = \partial\omega^{p,q} + \bar{\partial}\omega^{p,q} = \omega^{p+1,q} + \omega^{p,q+1} = \omega^{p+q+1},$$

которое, благодаря его антисимметричности, требует следующее равенство $d^2\omega=0$, открывающее путь в когомологические абелевы группы [4]. Символы $\partial$ и $\bar{\partial}$ обозначают соответственно внешнее дифференцирование по голоморфным и антиголоморфным координатам, причем из условия $d^2=0$ следуют равенства:

$$\partial^2 = \bar{\partial}^2 = 0, \partial\bar{\partial} + \bar{\partial}\partial = 0.$$

Эрмитова метрика g положительно определенная в каждой точке комплексного многообразия $M: T^{(1,0)}M \otimes T^{(0,1)}M \to C$ позволяет ввести эрмитову *(1,1)-форму* $\omega^{(1,1)}$ :

$$\omega^{(1,1)}(u,v) = g(Ju,v) = g(v,Ju),$$

где $u,v$ – векторные поля на $M$, или в вещественных индексах $\omega_{mn} = J_m^p g_{pn}$, и в комплексных голоморфных и антиголоморфных индеках $\omega = ig_{j\bar{k}} dz^j \Lambda d\bar{z}^{\bar{k}}$ [4]. Если выполнено условие замкнутости формы $d\omega = 0$, то эта форма называется келеровской, а комплексное многообразие $(M,J)$ с эрмитовой метрикой $g$ и келеровой формой $\omega^{(1,1)}$ является келеровым многообразием. Простейшим примером келерова многообразия является n-мерное комплексное пространство $C^n$. Соответственно форма, связанная с обычной евклидовой метрикой в комплексных координатах

$$g = \sum_j dz^j \otimes d\bar{z}^j,$$

представляется в виде

$$\omega^{1,1} = i\sum_j dz^j \Lambda d\bar{z}^j.$$

Другими примерами келеровых многообразий являются римановы поверхности, то есть ориентируемые комплексные многообразия комплексной размерности 1. Они келеровы, поскольку каждая двумерная форма замкнута, так как в вещественных двумерных измерениях такие формы нулевые. Комплексное проективное пространство $\mathbb{P}^n$ (вместо $C\mathbb{P}^n$ вводится сокращенное обозначение $\mathbb{P}^n$) также является примером келеровского многообразия. Из эрмитовости формы

$$\omega^{(2)} = \omega^{(2,0)} \oplus \omega^{(1,1)} \oplus \omega^{(0,2)} = \omega^{(1,1)}$$

следует зануление 2-х форм

$$\omega^{(2,0)} = \omega^{(0,2)} = 0,$$

В римановой геометрии связность Кристоффеля однозначно определяется требованием согласованности ее с метрикой $\nabla g=0$ [4],а также ее симметрии $\Gamma_{mn}^{\ p} = \Gamma_{nm}^{\ p}$ (т.е. нет кручения). На келеровом многообразии существует связность Черна $\Gamma_{mn}^{\ k}$, согласованная с требованиями $\nabla g=0$ и $\nabla J=0$, $\Gamma_{mn}^{\ k} = \Gamma_{nm}^{\ k}$так как $\partial_p g_{k\bar{m}} = \partial_k g_{p\bar{m}}$ (нет кручения). Благодаря условию келеровости ненулевыми остаются только компоненты $\Gamma_{\mu\nu}^{\rho}, \Gamma_{\bar{\mu}\bar{\nu}}^{\bar{\rho}}$ $\Gamma_{\mu\nu}^{\ \rho} = g^{\bar{\sigma}\rho}\partial_\mu g_{\nu\bar{\sigma}}$, где , $\Gamma_{\bar{\mu}\bar{\nu}}^{\ \bar{\rho}} = \overline{\Gamma_{\mu\nu}^{\ \rho}}$. Это упрощение для связности Черна соответственно приводит к сильному упрощению структуры тензора Римана: $R_{\mu\nu}^{\ \ \sigma}{}_{\rho} = -\partial_\nu \Gamma_{\mu\rho}^{\ \sigma}$. В результате форма Риччи приобретает следующий вид [4,6-9]

$$Ric = \frac{1}{4} R_{mn}^{\ \ k}{}_{j} J_k^{\ j} dx^m \Lambda dx^n = i\partial\bar{\partial} \log g^{1/2}.$$

Форма Риччи $d$-замкнута: $dRic=0$, так как $d = \partial + \bar{\partial}$ и $\partial\bar{\partial} = -\frac{1}{2} d(\partial - \bar{\partial})$. Форма Риччи определяет класс когомологии $c_1 = [1/(2n)Ric]$, который называется первым классом Черна М. Классы Черна являются классами когомологий, а формы Черна – их представителями. Первый класс Черна является аналитическим инвариантом, что в частности, выражается в инвариантности относительно гладких изменений комплексной структуры на М. При замене метрики [9] $g_{mn} \to g_{mn} + \delta g_{mn}$: $g^{1/2} \to g^{1/2} + \delta g^{1/2}$, $\delta g^{1/2} = 1/2 g^{1/2} g_{mn} \delta g_{mn}$, так что

$$\delta Ric = i\partial\bar{\partial}(g^{\mu\bar{\nu}}\delta g_{\mu\bar{\nu}}) = -id(\partial - \bar{\partial})(g^{\mu\bar{\nu}}\delta g_{\mu\bar{\nu}}).$$

В связи с тем, что $g^{\mu\bar{\nu}}\delta g_{\mu\bar{\nu}}$ – координатный скаляр, $\delta Ric$ является точной формой, даже если $Ric$ может и нет, то есть гладкая вариация метрики изменяет $Ric$, но класс $c_1$ остается инвариантным.

### Когомология форм на келеровских многообразиях

Более того, для метрики келера $g$ связность Черна (Леви-Чивита) не имеет смешанных индексов, что приводит к тому, что векторы с голоморфными индексами после параллельной транспортировки остаются с голоморфными индексами. Следовательно, для келеровых многообразий параллельный перенос вектора сохраняет голоморфность, что дает ограничение на группу голономии келеровых многообразий.

Форму келера всегда можно выразить локально в терминах гладкой функции, которая называется потенциалом келера. Однако глобально

это не верно. Локальное условие замкнутости формы Келера $d\omega^{(1,1)}=0$ эквивалентно уравнениям

$$\partial\omega=0\Rightarrow\partial_\mu g_{\sigma\bar\rho}-\partial_\sigma g_{\mu\bar\rho}=0\ ,\quad \bar\partial\omega=0\Rightarrow\partial_{\bar\mu} g_{\sigma\bar\rho}-\partial_{\bar\rho} g_{\sigma\bar\mu}\ ,$$

из которых следует, что для каждой карты $U_j$ решение для метрики зависит от скалярной функции $\phi_j(z,\bar z)$ в виде $g_{\rho\bar\sigma}=\partial_\rho\bar\partial_{\bar\sigma}\phi_j$, а значит и для формы $\omega=\partial\bar\partial\phi_j$. Функция $\phi_j(z,\bar z)$ является потенциалом келера, который не определен глобально, так что на пересечении двух карт $U_{j\cap}U_k$ соответствующие потенциалы келера $\varphi_j$ и $\varphi_k$ связаны соотношением

$$\phi_j=\phi_k+f_{jk}(z)+\bar f_{jk}(z)\ ,$$

то есть

$$exp\{\varphi_j\}=|exp\{f\}|^2 exp\{\varphi_k\},$$

где $e^{\varphi}$ – сечение нетривиального линейного расслоения над многообразием M [4,6-9].

Форма

$$\omega=i\partial\bar\partial\phi_k=-\frac{i}{2}d(\partial-\bar\partial)\phi_k$$

замкнута, но если бы выражение $(\partial-\bar\partial)\phi_k$ было определено глобально, то форма $\omega$ была бы точной, то есть равной нулю, как класс когомологий, что противоречит положительности объема многообразия $M$:

$$\int_M\omega^n=n!(volM)>0\ \to[\omega]\neq0\ ,$$

где $\omega^n=\omega\wedge\omega\wedge\ldots\wedge\omega\to$ – форма объема $n$-мерного многообразия. Если бы форма была бы точной, то есть $\omega=d\alpha$, то, используя замену $\omega\to d\alpha$ и теорему Стокса, можно было бы доказать, что $vol(M)=0$. Отсюда следует, что на компактном келеровом многообразии невозможно найти глобально определенный потенциал келера $M$. Значение само интеграла будет зависеть только от класса когомологий $[\omega]$, которые могут рассматриваться как класс когомологии ДеРама $[\omega]\in H_{dR}{}^2$ или класс когомологии Дольбо $[\omega]\in H_{\bar\partial}^{1,1}$. В результате, можно показать, что параметризация келеровых метрик и келеровых форм в каждом классе может осуществляться гладкими функциями.

На комплексном многообразии с метрикой келера теперь можно определять операторы типа звезда Ходжа $(*)$ и операторы $d^\dagger$ и $d$, то есть полностью использовать теорию Ходжа на келеровых многообразиях. Мы должны соотносить эту теорию с вещественной версией, поскольку комплексные многообразия также являются вещественными многообразиями, и, тем самым, найти дополнительные свойства келеровых многообразий. Оператор звезда Ходжи – это изоморфизм векторных расслоений

$$*:\wedge^m T^*M\to\wedge^{n-m}T^*M\ ,$$

однозначно отображающий m-форму $\alpha\in\wedge^m M$ на многообразии $M$ в $(n-m)$-форму, так что $\beta\wedge(*\alpha)=(\alpha,\beta)\omega^n$ для любой m-формы $\beta$ в $M$, $\beta\in\wedge^m M$ и $\omega^n\in\wedge^n M$- форма объема. Также вводится оператор $d^\dagger$, являющийся дополнением к $d$: $d^\dagger$: $\Omega^m(M)\to\Omega^{m-1}(M)$, где $d^\dagger=(-1)^{mn+n+1}*d(*)$.

Так как $(d^\dagger)^2=0$, то форма $d^\dagger\alpha$ козамкнута, а если $\alpha=d^\dagger\beta$, то форма $\alpha$ является коточной. Форма $\alpha$ является гармоничной, если действие лапласиана $\Delta=dd^\dagger+d^\dagger d$ зануляет эту форму, $\Delta\alpha=0$, то есть форма на компактном многообразии $M$ будет гармонической тогда и только тогда, когда она замкнута и ко-замкнута. В терминах голоморфных и антиголоморфных частей можно привести для келеровского многообразия следующие отображения[4,6-9]

$$\partial:\Omega^{p,q}(M)\to\Omega^{(p+1,q)}(M);\ \partial^\dagger:\Omega^{p,q}(M)\to\Omega^{(p-1,q)}$$
$$\bar\partial:\Omega^{p,q}(M)\to\Omega^{(p,q+1)}(M);\ \bar\partial^\dagger:\Omega^{p,q}(M)\to\Omega^{(p,q-1)}$$
$$*:\Omega^{p,q}(M)\to\Omega^{(n-p,n-q)}(M);$$

Согласно теории Ходжа любая m-форма из $\Omega^m(M)$ единственным образом может быть разложена на сумму гармонической формы, точной формы и ко-точной формы, то есть $\Omega^m(M)=H^m\oplus Im(d_{m+1})\oplus Im(d^\dagger_{m-1})$, где $H^m$ – векторное пространство гармонических $m$-форм на $M$. Существует изоморфизм между $H^m$ и $H^m{}_{dR}(M,\mathbb{R})$. Другими словами, каждый класс когомологий де Рама на M содержит единственного гармонического представителя. Расширяя теорию Ходжа на келеровы многообразия, разложение любой $(p,q)$-формы из $\Omega^{(p,q)}(M)$ может быть представлено единственным образом в виде суммы

$$\Omega^{(p,q)}(M)=H^{(p,q)}(M)\oplus\bar\partial\,[\Omega^{(p,q-1)}(M)]\oplus\bar\partial^\dagger[\Omega^{(p,q)}(M)],$$

где $H^{(p,q)}$- векторное пространство гармонических $(p,q)$-форм.

Определяя теперь $H^r{}_c$ – векторное пространство комплексных гармонических r-форм относительно $\Delta=dd^\dagger+d^\dagger d$ и используя

$$\wedge^r T^*{}_C M=\oplus_{j=(0,\ldots,r)}\wedge^{j,r-j}M$$

и следующие соотношения

$$\Delta=2\Delta_{(\bar\partial)}=2\Delta_{(\partial)};\ \Delta_\partial=\partial\partial^\dagger+\partial^\dagger\partial$$

можно получить следующее разложение комплексных гармонических форм $\Omega^{p,q}(M)\to\Omega^{(p,q)}(M)$ ранга $r=p+q$ в виде суммы гармонических $(p,q)$-форм [6-9]:

$$H^r{}_c=\oplus_{(p=0,..,r)}H^{(p,r-q)}.$$

Для келеровых многообразий комплексифицированные когомологии де-Рама преобразуются в разложение Дольбо:

$$H^r{}_{dR}(M,C)=\oplus_{(p=0,\ldots,r)}H^{p,r-p}(\bar\partial,M).$$

Отсюда в случае келеровского многообразия следует выражения для чисел $b^r=\sum_{p=0}^{p=r}h^{p,r-p}$, причем операции звезда Ходжа и комплексное сопряжение дают следующие равенства $h_{p,q}=h_{q,p}, h_{p,q}=h_{r-p,r-q}$ [6-9].

### Риччи метрика на проективных и келеровых многообразиях

На келеровых многообразиях метрический тензор, комплексная структура и келерова форма $\omega^{(1,1)}$ ковариантно постоянна, то есть $\nabla g=0$ , $\nabla J=0, \nabla\omega^{(1,1)}=0$. Из последнего равенства $\nabla\omega^{(1,1)}=0$, можно показать, что $d^*\omega^{(1,1)}=0$, где операция сопряжения внешнего дифференцирования d* в реальных координатах определяется по отношению к внутреннему произведению следующим образом:

$$(\alpha,\beta)=\int_M \alpha\wedge{}^*\beta,$$

где $\alpha$ и $\beta$ – две r-формы, причем

$$d^\dagger\alpha=-*d*\alpha=\frac{1}{r-1}g^{jk}\nabla_j\alpha_{kp_2\ldots p_r}dx^2\wedge\ldots\wedge dx^r$$

понижает ранг формы на r→r-1. Отсюда следует что, келерова форма удовлетворят условию гармоничности: $(dd^\dagger+d^\dagger d)\omega=0$.

Обычное комплексное проективное n-пространство $\mathbb{P}^n$ определяется введением $n+1$ однородных комплексных координат $z^1,\ldots,z^{n+1}$, не все из которых одновременно равны нулю с отношением эквивалентности таким, что координатные точки $(z^1,\ldots,z^{n+1})$ отождествляются с точками $(\lambda z^1,\ldots, \lambda z^{n+1})$ для любого комплексного числа $\lambda\in C^*(\lambda\in C,\ \lambda\neq 0)$. Комплексное проективное многообразие $\mathbb{P}^n$ является келеровским. Выбирая карты $U_j$ ( $j=1,\ldots,n+1$) с координатой $z^j\neq 0, (z^1,\ldots,z^{n+1})\in C^{n+1}\backslash\{0\}$ и $\lambda=1/z^j$ с однородными координатами $u^k=z^k/z^j$:

$(u_{1(j)},\ldots,u_{n(j)})=(z^1/z^j,\ldots z^{j-1}/z^j, z^{j+1}/z^j,\ldots,z^{n+1}/z^j)$ в $\mathbb{P}^n$.

Определяя $\Phi_j$ в $j$-ой карте как $\Phi_j=\sum_k|z^k/z^j|^2$, $k=1,\ldots,n+1$, можно убедиться, что $\omega=i\partial\bar\partial log\Phi_j$ является глобально определенной замкнутой 2-формой. Для этого нужно только проверить, что различия ω в перекрытиях являются точными. На основе келеровского потенциала $\Phi=log(1+|u|^2), |u|^2=|u^1|^2+\ldots+|u^n|^2$ для проективного пространства $\mathbb{P}^n$ строится келерова метрика (метрика Фубини-Стади), связанная с келеровской формой в виде [4,6-9]

$$\omega=i\partial\bar\partial\log(1+|u|^2)=i\left(\frac{du^j\wedge d\bar u^j}{1+|u|^2}-\frac{\bar u^j du^j\wedge u^k d\bar u^k}{(1+|u|^2)^2}\right).$$

Таким образом, выбранный келеровский потенциал на перекрытии двух карт $U_j\cap U_k$ удовлетворяет следующему соотношению:

$$\phi_j=\phi_k-\log(z^j/z^k)-\log(\bar z^j/\bar z^k).$$

Итак, для проектированного пространства: $C^{n+1}\backslash\{0\}\to\mathbb{P}^n$, определенным следующим образом: $(z^1,\ldots,z^{n+1})\to[z^1,\ldots,z^{n+1}]$, существует единственная положительная (1,1)-форма на $\mathbb{P}^n$ келерова форма на совместно с ассоциированной с ней метрикой келера, которая называется метрикой Фубини-Штуди и которая задается в компонентах формулой

$$g_{\mu\bar\rho}=\partial_\mu\partial_{\bar\rho}\log u,$$
$$u=|z^1|^2+\ldots|z^{n+1}|^2\ [7].$$

Известно, что любые подмногообразия келерова многообразия также являются келеровыми (поскольку ограничение формы келера на комплексное подмногообразие также является замкнутым, положительная (1,1)-форма). В результате $\mathbb{P}^n$-келерово и все его подмногообразия также келеровские подмногообразия.

Форма Риччи для $\mathbb{P}^n$ с метрикой Фубини-Стади имеет следующий вид $:Ric=-(n+1)\omega$, где $\omega$ – келерова форма. Так как форма $\omega$ гармонична, то и $Ric$ гармонична, и поэтому не может быть точной формой. Таким образом, класс Черна $c_1$ нетривиален и $\mathbb{P}^n$ не допускает плоской Риччи метрики [6-9].

При каких обстоятельствах многообразие Келера допускает плоскую метрику Риччи? Для g-произвольной метрики на M можно допустить существование другой метрики $g'$ на $M$, которая является Риччи-плоской. Соответствующие обе формы Риччи $Ric(g)$ и $Ric(g')$ принадлежат $[c_1(M)]$ $Ric(g)=Ric(g')+d\alpha$. Из условия $Ric(g')=0$ следует, что $Ric(g)$ должна быть точной и, следовательно, класс Черна $c_1$ должен быть тривиальным классом когомологий: $c_1=0$. Это равенство является необходимым условием для того, чтобы многообразие $M$ допускало Риччи-плоскую. метрику. Необходимость условия $c_1=0$ для Риччи-плоской метрики келерова многообразия M впервые было замечено Калаби еще в 50-х годах. Для комплексного многообразия $c_1=0$ и любой келеровой метрики $g^{(0)}$ с келеровой формой $\omega^{(0)}$, существует единственная Риччи – плоская метрика $g^{(1)}$, келерова форма $\omega^{(1)}$ которой принадлежит тот же класс когомологий, что и $\omega^{(0)}$(Яу) [8].

### Общие свойства Калаби-Яу многообразий

Калаби-Яу многообразие $CY_m$-вещественной размерности 2m, представляет собой компактное (односвязанное) келерово многообразие $(M,J,g)$ [6-12], требующее для окончательного определения одно ниже перечисленных характерных отличительных свойств:

1. имеет Ричи плоскую метрику;
2. с исчезающим первым классом Черна, $c_1(M)=c_1(K_M)=0$;
3. с тривиальным каноническим расслоением (m,0)-форм $\Lambda^m T^{*(1,0)}M$;
4. допускает глобально определенную и нигде не исчезающую голоморфную $m$-форму $-f(z)\,dz^1\wedge dz^2\wedge\ldots\wedge dz^m$;
5. с группой голономей $G_{Hol}=SU(m)$ (или $G_{Hol}\subseteq U(m)$);
6. допускает пару глобально определенных ковариантных постоянных спиноров.

Между этими определениями существуют тесные связи. В результате, можно определять многообразие Калаби-Яу как компактное комплексное келерово многообразие, обладающее $SU(m)$ голономией. Эквивалентное дополнительное утверждение состоит в том, что Калаби-Яу многообразие допускает Риччи-плоскую метрику:

$$R_{i\hat{j}} = -\frac{\partial}{\partial \bar{z}^{\bar{j}}}\Gamma^{k}_{ik} = 0 .$$

Обращение в нуль группы U(1) келеровской связности U(m)=SU(m)xU(1), по сути, ее следа, является гарантом того, что группа голономии лежит в группе SU(m), что равносильно наличию Риччи-плоской метрики.

Для заданного векторного расслоения $\Lambda^j E \to M$ ранга $r$ можно рассмотреть антисимметричные тензорные произведения расслоения для любого $j, 1 \le j \le r$, где переходные функции такие же, как для $E^{\otimes j}$, но где слои являются подпространства в $E^{\otimes j}$, состоящие из антисимметричных тензоров. Ранг $\Lambda^j E$ равен $\binom{r}{j}$ таким образом, что при $j=r$ возникает линейное расслоение ранга один. Так как переходные функции для этого линейного расслоения являются определителями матриц, то расслоение называют детерминантным. Детерминантное расслоение голоморфного кокасательного расслоения носит название канонического расслоения, которое является важной частью определения Калаби-Яу многообразий ($CY_m$) [6-9]. Для канонического линейного расслоения $(n,0)$-форм $K_M=\Lambda^n T^{*(1,0)}M$ канонический класс тривиален $[Ric]=2nc_1(K_M)=2nc_1(M)=0$. Это следует из того,что метрика Келера на многообразии $M$ индуцирует метрику и связность на $K_M$. Для компактного Риччи-плоского келерова многообразия $c_1=0$. Тривиальность этого расслоения означает, что все пространство $K_M$ задается как $M\times\mathbb{C}$, так как это голоморфное линейное расслоение (размерность слоя $\mathbb{C}$ равна одному).

Первый класс Черна комплексного векторного расслоения $E$ над $M$ задается формулой $c_1(E)=[i/2\pi TrF]$, где $F$ – кривизна связности. Классы Черна $c_j(E)\in H^{2j}(M,\mathbb{R})$ определяют разложение тотального класса Черна $c(E)=1+c_1(E)+c_2(E)+\ldots+c_r(E)$, $r$-ранг векторного расслоения. Независимо от размерности $M$, ряд заканчивается на $c_r(E)=det(iF/2\pi)$ и $c_j(E)=0$ для $j>r$, где $r$-ранг расслоения. Первый класс Черна многообразия $M$ определяется как первый класс Черна голоморфного касательного расслоения, и в этом случае 2-форма кривизны $F$ есть просто $-iRic$, где $Ric$ – 2-форма Риччи. Следовательно, для келерова многообразия M его первый класс Черна задается формулой $c_1=1/2\pi[trRic]$.

Форма Риччи определяет первый класс Черна келерова многообразия $M$. Вполне очевидно, что если келерово многообразие допускает Риччи-плоскую метрику, то оно имеет $c_1=0$. Однако гораздо сложнее доказать обратное, а именно, допускает ли келерово многообразие с $c_1=0$ Риччи-плоскую метрику. Калаби предположил и доказал, что Риччи-плоская метрика единственна, а существование ее было доказано Яу двадцать лет спустя. Точнее, было доказано, что для комплексного многообразия $M$ с келеровой метрикой $g$ келерова формой $\omega$ и $c_1=0$ существует единственная Риччи-плоская метрика $g'$, чья келерова форма $\omega'$ принадлежит тому же келеровому классу, что и $\omega$. В каждом классе Келера M есть единственная Риччи-плоская келерова метрика, которые образуют гладкое семейство размерности $h^{1,1}(M)$. Следовательно, $h^{1,1}(M)$ подсчитывает количество возможных Риччи-плоских келеровых форм на многообразии Калаби-Яу [6-12].

Итак, если первый класс Черна компактного келерова многообразия равен нулю, то $M$ несет плоскую метрику Риччи-Келера. Если первый класс Черна компактного келерова многообразия положителен, то M является просто связанным. Келерово многообразие имеет $b^2\ge 1$ из-за существования хотя бы нетривиального класса $[\omega]\in H^2(M,\mathbb{R})$.

Для канонического расслоения комплексного многообразия $M$ сечения его являются $\omega^{(m,0)}$–формами, то есть $\omega^{(m,0}\in K_M=\Lambda^{(m,0)}M$. Глобально определенную и нигде не исчезающая голоморфную $\omega^{(m,0)}$-форму принято называть голоморфной формой объема. Любую глобально определенная $(m,0)$-форму можно записать как $f\circ\omega^{(m,0)}$ – для некоторой голоморфной функции $f$ на компактном $M$ и расширение принципа максимального модуля комплексного анализа указывает, что $f$ постоянна и, следовательно, $h^{m,0}=1$.

С другой стороны, существование глобально определенной и нигде не исчезающей голоморфной $\omega^{(m,0)}$-формы непосредственно влечет тривиальность канонического расслоения. $K_M=\Lambda^m T^{*(1,0)}$ M тривиально тогда и только тогда, когда $c_1(T^{*(1,0)}M)=-c_1(T^{(1,0)}M)=-c_1=0$[8].

Теперь, если $M$ – Риччи-плоское келерово многообразие вещественной размерности 2m, то его группа голономии содержится в $SU(m)$. Если метрика Риччи-плоская, то $U(1)$ – часть группы голономии обращается в нуль, и группа голономии должна содержаться в $SU(m)$. Обратное также верно; если голономия келерова многообразия содержится в $SU(m)$, тогда его метрика Келера Риччи-плоская [6-12].

Многообразие Калаби-Яу допускает глобально определенную пару спиноров, $\zeta$ и комплек-

сно сопряженный $\bar{\zeta}$, которые ковариантно постоянны $\nabla^S\zeta=0, \nabla^S\bar{\zeta}=0$, где $\nabla^S$ – спиновая связность на спин-расслоении $S$ на $M$, индуцированной связностью Леви-Чивиты на расслоении $SU(3)\subset SO(6)$ на многообразии M [7,9].

Для ориентированного n-мерного риманового спинового многообразия $M$ с метрикой $g$ спинор $\zeta$ – это сечение спинового расслоения $S$ на $M$ $\zeta\in C^\infty(S)$, который принадлежит комплексному представлению $\Delta^n$ спиновой группы $Spin(n)$, дважды накрывающей $SO(n)$. Для четной размерности $dim=n=2m$, представление $\Delta^{2m}$ расщепляется на два неприводимых представлений $\Delta^{2m}=\Delta^{m+}\oplus\Delta^{m-}$, $dim\ \Delta^{m\pm}=2m-1$. Соответственно, спинорное расслоение $S=S^+\oplus S^-$ расщепляется на векторные подрасслоения $S^\pm$ на $M$ со слоями $\Delta^\pm$. В шести измерениях $CY_3$-многообразия восьми-компонентные спинор $\zeta$ преобразуются по представлению $4\oplus\bar{4}$ группы $SO(6)\backsimeq SU(4)$, причем относительно подгруппы $SU(3)xU(1)\subset SU(4)$ представление 4 группы $SU(4)$ распадается $SU(3)$-триплет и $SU(3)$-синглет: $4=3\oplus1$. В результате для просто связанного многообразия $M$ группа голономии спиновой связанности $\nabla^S$ следует из римановой группы голономии $G_{Hol}=SU(3)$. Здесь имеется взаимноднозначное соответствие между ковариантно постоянными спинорами и синглетами $\Delta^\pm$ группы голономии $SU(3)$.

Непосредственно можно доказать, что если $M$ – риманово многообразие, допускающее ковариантно постоянные спиноры, то он должен быть Риччи-плоским. Это следует из $[\nabla^S_m,\nabla^S_p]\zeta=-4R_{mpjk}\gamma^{jk}\zeta=0$[9].

Сворачивая с гамма-матрицей $\gamma^p$ и, используя тождество $\gamma^p\gamma^{jk}=\gamma^{pjk}+2g^{p[j}\gamma^{k]}$, можно показать, что величина $R_{mpjk}\gamma^{jk}$ обращается в нуль вследствие ($R_{m[pjk]}=0$) и, соответственно, $R_{mp}=0$.

### Когомологии и даймонд Ходжа для Калаби-Яу многообразий

Многообразие Калаби-Яу M с ненулевым числом Эйлера имеет $b_1=0$. Так как $b_1$ является топологическим инвариантом достаточно установить это равенство для Риччи – плоской метрики [9]. Рассматривая действие Лапласиана $\Delta=dd^\dagger+d^\dagger d$ на гармоническую1-форму $\omega^{(1)}=v_k dx^k$, то есть

$$\Delta\,\omega^{(1)}=(-g^{jm}\nabla_j\nabla_m v_k+R_{km}\int g^{mj})dx^k=0,$$

и учитывая $R_{km}=0$, слагаемое $g^{jm}\nabla_j\nabla_m v_k=0$ приводит к следующему равенству:

$$\int_M g^{1/2}dx^6(v^k g^{jm}\nabla_j\nabla_m v_k)=0 \longmapsto \nabla_m v^k=0.$$

Так как векторное поле на многообразии с числом Эйлера $\chi$ имеет не менее $|\chi|$ нулей, то $v^k$ должен иметь ноль и, учет $\nabla_j v^k=0$, дает окончательное утверждение, что $v^k=0$ – тождественно.

Для компактного многообразия $M$ вещественной размерности 2m – наличие в нем келеровой замкнутой формы $\omega^{(1,1)}$ определяет класс Дольбо когомологии $[\omega]\in H^{1,1}_{\bar\partial}(M)$, а также класс когомологии дeРама $[\omega]\in H^2_{dR}(M,R)$. Следовательно, гладкие функции на $M$ параметризуют множество форм Келера в конкретном классе Келера. Используя группы когомологий,можно определить такие важные топологические инварианты, как числа Бетти

$$b_p=dim_{\mathbb{R}}H^p_{dR}(M,\mathbb{R})=dim_C H^p_{dR}(MC)$$

и, соответственно, $H^k=\oplus_{p+q=k}H^{(p,q)}(M)$, где $H^k$ – множество гармонических k-форм. Когомологии де Рама и $\hat\partial$-когомологии эквивалентны (если М-Келер: $\Delta_d=2\Delta_{\bar\partial}=2\Delta_{\bar\partial}$). В результате, числа Бети и Эйлеровская характеристика, соответственно, равны

$$b^p=\sum_{j=0}^{p}h^{j,p-j}\ \text{ и }\ \chi=\sum_{p=0}^{p=m}(-1)^p b^p,$$

причем с уже определенными для Калаби-Яу многообразий соотношениями между числами Ходжа:

$$h^{p,q}=h^{n-q,n-p},\ h^{p,q}=h^{q,p},\ h^{n,0}=h^{0,n}=1.$$

Более того для Калаби-Яу многообразий существует так называемая голоморфная дуальность. Тривиальность канонического расслоения многообразия Калаби-Яу действительной размерности $2n=6$ приводит к равенству $h^{3,0}=1$, т.е. существованию единственной голоморфной формы объема. Для $(0,q)$ класса когомологий $[\alpha]$ существует единственный $(0,3-q)$ класс когомологий $[\beta]$, такой, что

$$\int_M \alpha^{(0,q)}\wedge\beta^{(0,3-q)}\wedge\omega^{(3,0)}=1.$$

В результате, возникает еще одно соотношение $h^{0,q}=h^{0,3-q}$. Суммируя все соотношения на многообразиях Калаби-Яу

$$h^{3,0}=h^{0,3}=h^{0,0}=h^{3,3}=1,\ h^{1,0}=h^{0,1}=h^{2,0}=h^{0,2}=$$
$$h^{3,1}=h^{1,3}=h^{3,2}=h^{2,3}=0,$$

в результате свободными остаются только два параметра $h^{1,1}=h^{2,2}, h^{2,1}=h^{1,2}$ и для числа Эйлера имеем следующее уравнение $\chi=2(h_{1,1}-h_{2,1})$ [6-12].

### Примеры многообразий Калаби-Яу

Комплексное измерение $dim\ M=1$. $\mathbb{P}^1$ – не является многообразием Калаби-Яу. $\Sigma_g$ риманова поверхность рода $g$ является поверхностью Калаби-Яу многообразия только при $g=1$. То есть тор $T^2$ является единственным топологическим типом с группой голономией $G_{Hol}=SU(1)$. Комплексное измерение $dimM=2$. Существует только один топологический тип диаграммы Калаби-Яу – многообразие с $G_{Hol}=SU(2)$. Это поверхности $K3$, при $G_{Hol}\subset SU(2)$-$T^4$. Для Калаби-Яу многообразий трех комплексных измерений имеется более $\sim 3x10^5$ примеров с группой голономии $G_{Hol}=SU(3)$, которые могут быть постро-

ены как гиперповерхности и полные пересечения в торических многообразиях. Также есть такие, у которых $Hol \subset SU(3)$, как и для пример $T^6$ и $T^2xK3$ [7-9].

### Калаби-Яу многообразия в проективных пространствах

Компактные Калаби-Яу многообразия могут быть построены как подпространства больших комплексных многообразий. Рассмотрим построение таких многообразий с помощью вложения, заданного однородными полиномами, определенными в проективном пространстве $\mathbb{P}^n$. Полином $f \in C[z^0,z^1,..,z^n]$ является однородным степени d, если каждое слагаемое будет той же степени $d$, то есть $f(\lambda z^1,\ldots,\lambda z^{n+1})=\lambda^d f(z^1,\ldots,z^{n+1})$, $\lambda \in C^*$. Для любой точки $y \in \mathbb{P}^n$ нельзя рассматривать сами однородные полиномы, но уравнение $f(y)=0$ уже хорошо определено. Таким образом, однородные полиномы $f^1,\ldots,f^r \in C[z^1,z^2,\ldots,z^{n+1}]$ определяют алгебраическое многообразие (variety)

$$\hat{W}(f^1,\ldots,f^r)=\{y \in \mathbb{P}^n \mid f^1(y)=\ldots=f^r(y)=0, r \le n\} \subset \mathbb{P}^n$$

Так, аналитическое подмногообразие $\hat{W}$ комплексного проективного многообразия, $\mathbb{P}^n$ можно задать системой аналитических уравнений такой, что ранг $|\partial f^a/\partial z^j|_y$, где $z^j, j=1,..,n$ – координаты на $\mathbb{P}^n$, не зависит от точки $y \in \mathbb{P}^n$ и равен $r$. Выбрав следующую локальную систему координат [6-9]

$$w^a(y) \equiv f^a(y),\ a=1,..,r;\ w^j(y) \equiv z^j(y),\ j=r+1,\ldots n,$$

алгебраическое многообразие $\hat{W}$ определяется как

$$w^1(y) = w^2(y) = \ldots = w^r(y) = 0.$$

Тогда $w^{j+r}(y)$, $j=1,\ldots,n-r$ – локальные координаты подмногообразия $\hat{W}$ комплексной размерности $n-r$.

В качестве метода построения Калаби-Яу многообразия $CY_m$ было рассмотрено комплексное проективное компактное многообразие $\mathbb{P}^n$, все подмногообразия которого также компактны. Более того, согласно известной теореме Чоу, любое подмногообразие $\mathbb{P}^n$ может быть реализовано как геометрическое место нулей конечного числа однородных полиномиальных уравнений.

Разительным отличием от уникального комплексного многообразия $CY_2=K3$, для которого для класса $H^2$ существует одно единственное значение числа Ходжи $h^{1,1}=20$, является тот факт, что для Калаби-Яу многообразий $CY_3$ комплексной размерности 3 таких возможностей для пар чисел Ходжа, $\{h^{1,1},h^{2,1}\}$, уже несколько сот тысяч [6-9,11,12]. Простейшим примером $\hat{W}=CY_3$ является квинтик, определяемый как множество точек в комплексном проективном четырехмерном пространстве $\mathbb{P}^4$ с однородными координатами $(z^1,\ldots,z^5)$, заданное нулями уравнения $\wp(z^1,\ldots,z^5)=(z_1)^5+(z_2)^5+\ldots+(z_5)^5=0$. Чтобы понять, почему это многообразие Калаби-Яу, сначала убеждаемся через выполнение уравнения $\wp(\lambda z^1,\ldots,\lambda z^5)=0$ в корректности определения $\wp$ на $\mathbb{P}^4$. Локус $W$, заданный $\wp=0$, является келеровым, как подмногообразие келерова многообразия $\mathbb{P}^4$. В общем случае, именно весовой вектор $k=(k_1,\ldots,k_{n+1})$ будет определять значение первого класса Черна локуса $\{W=0\}$ в $\mathbb{P}^4$. Для вычисления классов Черна самого $\mathbb{P}^4$ может быть использован принцип расщепления [6-9]. Кривизна 2-форма этого расслоения может быть диагонализована до матрицы $5x5diag(\omega,\ldots,\omega)$, где $\omega$ – келерова форма на $\mathbb{P}^4$ с $(\mathbb{P}^4)=(1+\omega)^5$, где правая часть подчиняется $\omega^5=0$, поскольку $\mathbb{P}^4$ четырехмерный, $c_1(\mathbb{P}^4)=5\omega$. Для $n$-мерного случая $c_1(\mathbb{P}^n)=(1+\omega)^{n+1}$. Чтобы вычислить классы Черна $W=\{\wp=0\}$ в $\mathbb{P}^4$, заметим, что касательное расслоение $T\mathbb{P}^4$ многообразия $\mathbb{P}^4$ при ограничении до $\{\wp=0\}$ к $T\mathbb{P}^4|\wp=0=TW \oplus NW$, где $TW$ и $NW$ – касательное расслоение к W и нормальное расслоение к $W$ внутри $\mathbb{P}^4$, соответственно. Исходя из следующего равенства

$$c(T\mathbb{P}^4|\wp_{=0})=c(TW) \wedge c(NW),$$

можно показать, что

$$c(TW)=c(T\mathbb{P}^4|_{\wp=0})/c(NW)\ [6\text{-}9].$$

Теперь нормальное расслоение $NW$ является линейным расслоением над $\{\wp=0\}$, и можно показать, что оно имеет форму Черна $(1+k\omega)$. Тогда правая часть интерпретируется как формальный степенной ряд в ω. Итак,

$$c(TW)=(1+k\omega)^5/(1+k\omega)=1+(5-k)\omega+\ldots$$

Отсюда мы видим, что локус $\{\wp=0\}$ имеет нулевой первый класс Черна, если он определяется однородным многочленом степени $k=5$.

В общем случае, при вложении в n-мерное $\mathbb{P}^n$ следующее соотношение [7-9]

$$c(TW)=(1+\omega)^{n+1}/(1+k\omega)=1+(n+1-k)\omega+\ldots$$

указывает на то, что в $\mathbb{P}^2$ однородный полином должен быть третьей степени, то есть эллиптической кривой $CY_1$, в $\mathbb{P}^3$ – 4-ой степени – $CY_2=K3$-поверхностью, в $\mathbb{P}^4$ –5-й степени, $CY_3$ – гиперповерхностью.

Для $CY_1$-эллиптической кривой числа Бетти-Ходжа имеют следующие значения $h^{0,0}=h^{1,1}=1$, $h^{1,0}=h^{0,1}=1$, а число Эйлера $\chi=h^{0,0}-h^{1,0}-h^{0,1}+h^{1,1}=0$.

Для $CY_2=K3$-комплексной поверхности $c(W)=1+6\omega^2$ число Эйлера равно:

$$\chi=\int wc_2(W)=\int_{CP3} c_1(N) \wedge c_2(W)=\int_{CP3} 4\omega \wedge 6\omega^2=$$
$$=24\int_{CP3}\omega^3=24.$$

Исходя из $h^{0,0}=h^{2,2}=1$, $h^{0,1}=h^{1,0}=h^{2,1}=h^{1,2}=0$, $h^{2,0}=h^{0,2}=1$, $b^2=h^{2,0}+h^{1,1}+h^{0,2}$, а также $\chi=\sum_p(-1)^p b^p=1+0+b^2+0+1=24$, вычисляем число Ходжа $h^{1,1}=20$ [6-9]. Все инвариантные тополо-

гические числа для К3-поверхностей однозначно определены, что все они диффеоморфны друг к другу.

Для квинтика $CY_3$, $c(W)=1+10w^2-40w^3$, $c_2=10w^2, c^3=-40w^3$, можно вычислить число Эйлера

$$\chi=\int_W c_3(W)=\int_{P^4} c_1(N)\Lambda c_3(W)=-200,$$

а также доказать, что $b^2=h^{1,1}$. В результате,

$$b^2=h^{1,1}=1,\ b^3=2(1+h^{2,1}),\ h^{2,1}=h^{1,2}=101,$$
$$\chi=2(h_{1,1}-h_{2,1})=-200.$$

В *таблице 1* есть много обобщений представленных конструкций [6-12]. Можно рассматривать полные пересечения многочисленных полиномиальных уравнений в многомерном проективном и весовом проективном пространствах и строить Калаби-Яу многообразия в них.

### Весовые проективные пространства и проективные орбифолды

Класс Калаби-Яу многообразий значительно может быть расширен, если рассмотреть их построение с помощью весовых проективных пространств, которые являются обобщениями обычных проективных пространств. Для данного набора целых положительных чисел – весовой вектор $\{\vec{k}=k_1,\ldots,k_{n+1}|\}\sum_j k_j=d\}$, весовое проективное пространство $\mathbb{P}^n(k_1,k_2,\ldots,k_{n+1})\equiv\mathbb{P}^n(\vec{k})$ строится на базе комплексного (n+1)-мерного пространства $C^{n+1}(z^1,\ldots,z^{n+1})\backslash$ с факторизацией по каждой переменной $(z^1,\ldots,z^{n+1})\sim(\lambda^{k_1}z^1,\ldots,\lambda^{k_{n+1}}z^{n+1})$, $\lambda\in C^*$. Фактически, оно является обобщением обычного проективного пространства $\mathbb{P}^n\equiv\mathbb{P}^n(\vec{k}_0)$, ($\vec{k}_0=(1,\ldots,1)_{(n+1)}$.

Примером может являться двумерное весовое комплексное проективное пространство

$$\mathbb{P}(k_1,k_2,k_3),\ \vec{k}=(1,2,3)\ [6],$$

которое может быть построено как вложение в пространство $C^3\backslash\{0\}$ с соответствующей факторизацией

$$C^*:\vec{k}=(1,2,3),(z^1,z^2,z^3)\sim(\lambda z^1,\lambda^2 z^2,\lambda^3 z^3).$$

Как и для проективных пространств это компактное комплексное келерово многообразие. В качестве более сложных примеров можно рассматривать гиперповерхности и полные пересечения в весовых проективных пространствах и их произведениях [6-12].

Одна из появившихся сложностей заключается в том, что $\mathbb{P}^n(k_1,k_2,\ldots,k_{n+1})$ в общем случае не является гладким, поскольку при отождествлении координат возможны нетривиальные неподвижные точки приводящие к сингулярностям-орбифолдам. Так, если веса $(k_1,k_2,\ldots,k_{n+1})$ не все взаимно просты, тогда возможны нетривиальные значения $\lambda$ так, что $\lambda^{k_i}=\lambda^{k_j}=1$ для некоторых $i\neq j$.Тогда при занулении всех других координат, неудовлетворяющих этому уравнению, образуется подпространство весового проективного пространства, являющееся особым, так как является множеством неподвижных точек. В частности, если $k_{n+1}>1$, то точка $x=(0\ldots 0,1)\sim(0,\ldots,0,\lambda^{n+1})$, $\lambda\in C^*$, остается неподвижной относительно действия конечной подгруппой $G$ группы $C^*:G=\{\lambda\in C^*:\lambda_k^{(n+1)}=1\}$. Группа G изоморфна циклической группе $Z_{k_{n+1}}$ [6,7,9] Можно показать, что открытое множество

$$U_{n+1}=\{(z^1,z^2,\ldots,z^{n+1})\in CP^n(k_1,k_2,\ldots,k_{n+1}):z^{n+1}\neq 0\}$$

изоморфно C/G, где G действует на $C^n$ следующим образом

$$(z^1,..,z^n)\to(\lambda^{k1}z^1,\ldots,\lambda^{kn}z^n),\ \lambda\in G$$

В терминах полиномиального кольца $C[z^1,\ldots,z^{n+1}]$ переменная $z^j$ имеет степень $k_j$, а полином $f\in C[z^1,\ldots,z^{n+1}]$ является весовым однородным степени $d:f(\lambda^{k1}z^1,\ldots,\lambda^{k(n+1)}z^{n+1})=\lambda^d f(z^1,\ldots,z^{n+1})$. Эти полиномы позволяют определить идеалы $I\subset C[z^1,\ldots,z^{n+1}]$ и соответствующее весовое проективное многообразие $W(I)\subset\mathbb{P}(k_1,\ldots,k_{n+1})$.

### Классификация Калаби-Яу пространств в торической геометрии и универсальная алгебра рефлексивных проективных чисел

Многомерные комплексные $CY_m$-многообразия могут быть расположены в последовательности комплексных пространств всевозрастающей комплексной размерности: $m=1$-мерных торов $T^2$, $m=2$-мерно-комплексных пространств $K3$, $m=3$-трехмерных комплексные пространства $CY_3$, четырехмерные комплексные

**Таблица 1**

Даймонд Ходжа для квинтика в комплексном проективном пространстве $P^4$. Квинтик имеет единственную Риччи-плоскую келерову форму.

Класс Эйлера $\chi=2(h^{1,1}-h^{2,1})=-200$.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $h^{0,0}=1$ | | | |
| | | $h^{1,0}=0$ | | $h^{0,1}=0$ | | |
| | $h^{2,0}=0$ | | $h^{1,1}=1$ | | $h^{0,2}=0$ | |
| $h^{3,0}=1$ | | $h^{2,1}=101$ | | $h^{1,2}=101$ | | $h^{0,3}=1$ |
| | $h^{3,1}=0$ | | $h^{2,2}=1$ | | $h^{1,3}=0$ | |
| | | $h^{3,2}=0$ | | $h^{2,3}=0$ | | |
| | | | $h^{3,3}=1$ | | | |

пространства $CY_4$ и т.д., топологическая структура которых значительно усложняется с ростом размерности [6-12]. Топологические числа Бетти-Ходжа различных многообразий $CY_m$ определяют эйлеровы характеристики, которые могут быть связаны с фундаментальными физическими числами, как число поколений, которые возникают при компактификации на $CY_m$ пространства с $m=2,3,4$ в теории 10-мерных суперструн или M/F теорий [6,7,9,11,12]. Это подчеркивает желательность систематического подхода к проблеме их классификации и взаимосвязи, например, между многообразиями различных размерностей. Мощный систематический подход к построению пространств $CY_m$ различных размерностей стал возможным в торических многообразиях в комплексных весовых проективных пространствах, которые могут быть связаны с рефлексивными многогранниками и использованием зеркальной симметрии [5]. Множество квазиоднородных полиномов

$$\wp = \sum_{\vec{\mu}} c_{\vec{\mu}} z^{\vec{\mu}},$$

где $z^{\vec{\mu}} = (z^1)^{\mu_1} ... (z^{n+1})^{\mu_{n+1}}$ в комплексном весовом проективном пространстве $\mathbb{P}(k_1,...,k_{n+1})$, определяемом весовым вектором

$$\vec{k} = (k_1,...,k_{n+1}), \vec{\mu} \cdot \vec{k} = d = k_1 + ... + k_{n+1},$$

определяет выпуклый рефлексивный многогранник $\Delta$, пересечение которого с целочисленной решеткой $\boldsymbol{Z}^n$ соответствует к полиномиальным уравнениям $CY_m$-пространств $(m=n-1)$. Поэтому вместо изучения сложных гиперповерхностей непосредственно можно изучать геометрию многогранников. Эта работа [5] открыла путь для проекта «Геном Калаби-Яу» с целью классификации нашего возможного феноменологического наследия от теории струн. В рамках этого подхода $CY_m$-многообразия и их зеркальные партнеры представляют собой торические многообразия, которым можно сопоставить многогранники в пространствах соответствующей размерности $(m+2)$. Характеризация $CY_m$-многообразий в терминах соответствующих многогранников Ньютона, определенных как линейные оболочки всех векторов $\vec{\mu}$ обеспечивает систематический подход к классификации их и отражает зеркальную симметрию [5]. Обозначая вектор $\vec{\mu}'$ без штриха ($'$), определение решетки упрощается:

$$\Lambda \equiv \{\vec{\mu} : \vec{\mu} \cdot \vec{k} = 0\}$$

с базисными векторами $\sim \vec{e}_i$.

Было показано, что для того, чтобы многогранник $\Delta$, определяемый как выпуклая оболочка всех таких векторов $\vec{\mu}$, описывал бы CY-пространство, должен быть рефлексивным[5], т.е.

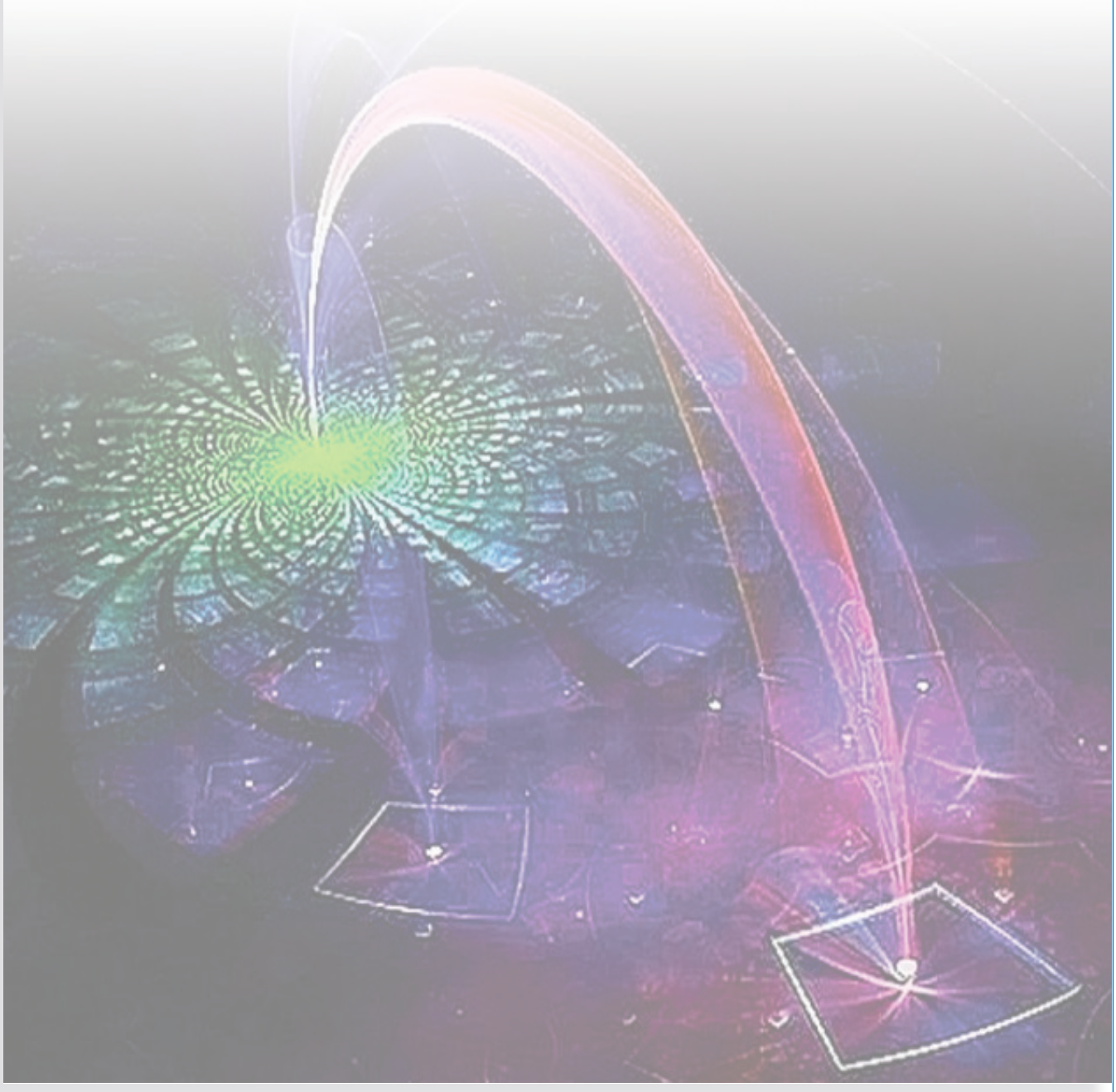
- вершинам многогранника $\Delta$ должны соответствовать векторы $\vec{\mu}$ с целыми компонентами;
- должна быть только одна внутренняя точка, называемая центром;
- расстояние любой грани многогранника от центра должно быть равно единице;
- зеркальный многогранник $\Delta^*$ любого рефлексивного многогранника также рефлексивен, и следовательно, определяет соответствующее зеркальное CY-пространство.

Благодаря этим результатам открывалось несколько путей к классификации $CY_m, m=1,2,3,4,....$ Один путь – геометрический, то есть идти через построение все возможных рефлексивных многогранников в любой размерности [11], а другой – алгебраический, то есть найти алгоритм построения всех весовых векторов, отвечающих Калаби-Яу многообразиям [12]. Основные идеи алгебраического подхода с построением универсальной алгебры всех рефлексивных проективных векторов любой размерности. Алгебра расширения размерности рефлексивных весовых векторов начинается с проективного рефлексивного веса $k=(1)$ и затем двумерного проективного веса $k=(1,1)$. Универсальность алгебры заключается во многооперационных законах композиции, то есть кроме бинарных операций «расширения» и «сжатия», надо последовательно применять и n–арные операции композиции с $n=3,4,5,...$ Алгебра рефлексивных проективных векторов была успешно применена для подсчета рефлексивных проективных весовых векторов $CY_2=K3$- и $CY_3$- многообразий [11,12]. Алгебра рефлексивных весовых векторов фактически восходит к теории многомерных чисел (операды) и требует обсуждений связи ее с ториковой геометрией, что мы и намечаем сделать в следующей статье. Мы также планируем продолжить обсуждение ряда достижений ториковой геометрии в многомерных проективных келеровых и Калаби-Яу многообразий в тесной связи изучения возможных приложений к геометрическим методам квантового запутывания многокубитных и кудитных квантовых состояний.

**Литература**

1. Волков Г.Г., Масликов А.А., Царьков А.Н., Смуров С.В. О геометрии невидимого света вселенной// Известия Института инженерной физики, 2020. №1(55). С.74-84.
2. Царьков А.Н., Смуров С.В., Волков Г.Г. Тернарные неабелевы симметрии о запутывании многомерных пространств// Известия Института инженерной физики, 2020. №2(56). С.74-81.
3. Смуров С.В., Волков Г.Г., Столбов С.Н., Царьков А.Н. Новые симметрии многомерной геометрии в квантовой физике и квантовой информа-

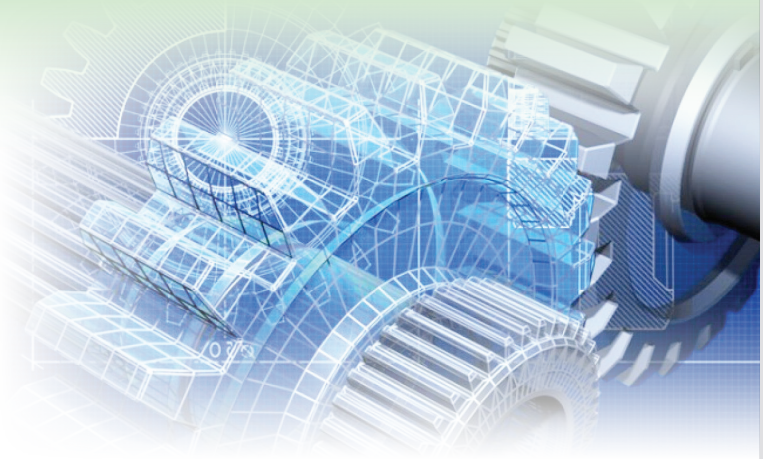
ции// Известия Института инженерной физики, 2020. №3(57). С.85-94.
4. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия. М.: Наука, 1979.
5. Batyrev V. Dual Polyhedra and Mirror Symmetry for Calabi-Yau Hypersurfaces in Toric Varieties, J. Algebraic Geom. 3 (1994). 493p.
6. Greene B.R. String theory on calabi-yau manifolds, Lectures given at the TASI-96 summer school on Strings, Fields and Duality. CU-TP-812.
7. Bouchard V. Lectures on complex geometry, Calabi-Yau manifolds and toric geometry arXiv:hep-th/0702063. Vol.1. 8 Feb 2007.
8. Moroianu A. Lectures on Kahler Geometry, Cambridge University Press. January 2010.
9. Xenia de la Ossa,Calabi-Yau Manifolds and Mirror Symmetry,Oxford, HT, 2010.
10. Kreuzer M., Skarke H. Reflexive Polyhedra, Weights and Toric Calabi-Yau Fibrations, HUB-EP-00/03, TUW-00/01, math.AG/0001106.
11. Anselmo F., Ellis J., Nanopoulos D., Volkov G. Towards an algebraic classification of Calabi-Yau Manifolds: Study of K3 spaces, Phys. Part. Nucl. 32(2001) 318-375; Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra 32 (2001).Pp. 605-698.
12. Alselmo F., Ellis J., Nanopoulos D.V., Volkov G. Results from an Algebraic Classification of Calabi-Yau Manifolds Phys. Lett. B499, 2001. Pp.187-199.



УДК 744(07):378

# ОБУЧЕНИЕ КУРСАНТОВ ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКЕ: ПРОТИВОРЕЧИЯ

# TRAINING OF CADETS OF A MILITARY TECHNICAL UNIVERSITY IN ENGINEERING GRAPHICS: CONTRADICTIONS



Куралай Сапаровна Халикова
преподаватель кафедры механики и инженерной графики филиал ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7 (4967) 79-02-27
E-mail: halikova3965@mail.ru

Ирина Андреевна Маврина
*доктор педагогических наук, профессор*
профессор кафедры социальной педагогики и социальной работы
Омский государственный педагогический университет
Адрес: 644099, г. Омск, ул. Партизанская, д. 4а
Тел.: +7 (3812) 23-37-64

**Аннотация**
Исследована сложившаяся практика обучения курсантов инженерной графике, эмпирическим путем установлены некоторые противоречия, дополнительно актуализирующие проблему. Представлены основные результаты диагностического исследования. Авторский материал может быть использован исследователями, занимающимися вопросами развития инженерного образования.
**Ключевые слова:** инженерная графика; военный вуз; техническое образование; трудности; противоречия.

**Summary**
The established practice of teaching cadets in engineering graphics is investigated, some contradictions are established empirically, which additionally actualize the problem. The main results of the diagnostic study are presented. The author's material can be used by researchers involved in the development of engineering education.
**Keywords:** engineering graphics; military University; technical education; difficulties; contradictions.

Проблема обучения курсантов военно-технического вуза инженерной графике в отечественной педагогике поставлена достаточно давно и широко, объединяя широкий круг вопросов: от общего назначения дисциплины до применяемых технологий обучения.

Для анализа процесса обучения инженерной графике было выполнено диагностическое исследование на базе трех вузов: филиала Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (г. Серпухов) далее ФВА РВСН, Омского автобронетанкового инженерного института (далее – ОАБИИ), Омского государственного технического университета (далее – ОмГТУ).

Выполненное диагностическое исследование позволило установить, что сложившаяся в современных условиях практика обучения курсантов военно-технических вузов инженерной графике является противоречивой, причем основные противоречия проявляются, как минимум, на трех взаимосвязанных уровнях:

- на уровне организации инженерного (в том числе и военно-инженерного) образования;
- на уровне организации образовательного процесса военно-технического вуза;
- на уровне организации деятельности преподавателя графических дисциплин военно-технического вуза.

На уровне организации инженерного образования исследуемая практика обучения курсантов военно-технического вуза инженерной графике обнажает общие проблемы инженерного образования, связанные с разрывом преемственности школьной и профессиональной ступеней. В отличие от Федеральных государственных образовательных стандартов высшего технического образования ФГОС общего (полного) среднего образования на базовом уровне почти не определяет требований, связанных с графической подготовленностью выпускников, за исключением предметных задач по геометрии, обеспечивающих *«…владение основными понятиями о плоских и пространственных геометрических фигурах, их основных свойствах; сформированность умения распознавать на чертежах, моделях и в ре-*

*альном мире геометрические фигуры; применение изученных свойств геометрических фигур и формул для решения геометрических задач и задач с практическим содержанием»* [1]. Отсутствие в учебном плане современной школы специального курса, ориентированного на начальные графические компетенции, обусловливает разрыв между школьной подготовкой и начальными требованиями инженерного образования, как минимум, в двух направлениях: в обеспечении прикладного характера обучения геометрии и развитии образного и пространственного мышления ученика. К такому выводу мы пришли, тестируя входной уровень готовности курсанта к освоению содержания учебной дисциплины «Инженерная и компьютерная графика».

По общему мнению преподавателей графических дисциплин, самыми актуальными проблемами разрыва графической подготовки между школой и вузом являются:

- умение представлять двухмерное и, особенно, трехмерное пространство через формальные геометрические конструкции;
- графическое моделирование объектов и процессов с использованием формальных геометрических конструкций.

Общий уровень развития пространственного мышления курсантов и студентов, поступивших в 2015 г. на первый курс обучения перечисленных выше вузов, тестировался с помощью методики И.С. Якиманской, В.Г. Зархина, Х.-М.Х. Кадьяс (*рисунок 1*) [2].

Во-первых, следует отметить, что в трех независимых выборках нами были получены приблизительно одинаковые результаты тестирования уровня пространственного мышления обучающихся.

Во-вторых, обращает на себя внимание наличие достаточно обширной группы респондентов, около 30-40% (*рисунок 1*), вообще обладающих низким уровнем развития пространственного мышления. Даже при наличии правильного решения задачи респонденты не могли исполнить решение в соответствии с собственным замыслом, представить или описать его. Качественный анализ результата позволил установить, что он связан не столько со способностями испытуемых, сколько с отсутствием у них элементарного опыта графической деятельности.

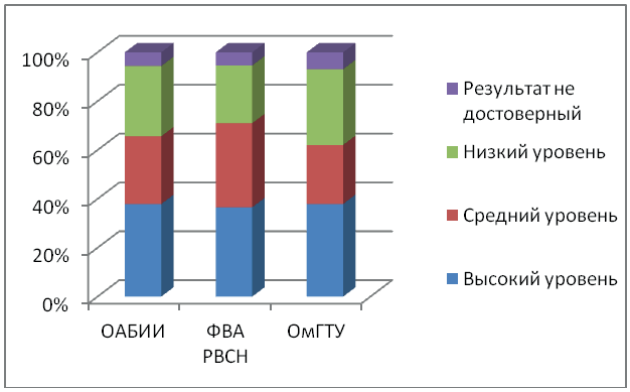



**Рис.1.** Результат тестирования уровня пространственного мышления курсантов и студентов

К начальному, так называемому в среде преподавателей графических дисциплин, «элементарному» уровню формирования графических компетенций первокурсников традиционно относятся некоторые знания, умения и навыки, которыми должны были владеть большинство выпускников школы. Элементарные графические знания, умения и навыки, по нашему мнению, – это след политехнической традиции, прочно укоренившийся в сознании и до сих пор определяющий подходы к формированию графических дисциплин в вузе.

У курсантов же отсутствует или слабо развит целый ряд знаний, умений и навыков, на наличие которых рассчитаны первые темы и разделы специальных графических и инженерных дисциплин. В настоящем исследовании мы называем их «образовательные дефициты», подразумевая необходимость их обязательного устранения для овладения инженерной графикой на том уровне, который необходим современному инженеру. Поэтому устранение разрыва в графической подготовке между школой и техническим вузом есть самостоятельная научная проблема, которая должна решаться, как в школе, так и в самом техническом вузе.

Данный вывод позволил констатировать наличие *противоречия* между требованием преемственности в образовании и несоответствием в графической подготовке курсантов на ступенях общего (полного) среднего и высшего военного инженерного образования.

На уровне организации образовательного процесса военно-технического вуза диагностическое исследование позволило выявить, что военно-технические вузы пока не в полной мере учитывают актуальное значение инженерной графики в профессиональной деятельности военного инженера. Прежде всего, обучение курсантов инженерной графике расценивается как локальная учебная задача, способствующая развитию учебного потенциала курсанта до уровня, позволяющего ему осваивать другие дисциплины.

Проведенные в ходе диагностического исследования рабочие кафедральные и межкафедральные обсуждения, дали возможность установить, что объем и рекомендуемое содержание графических дисциплин в настоящее время не в пол-

ной мере отвечают потребностям общеинженерной и, в целом, профессиональной подготовки курсантов. С этим согласились практически все участники. Результаты исследования, включающие продуктивные обсуждения стоящей проблемы, позволили сделать следующие выводы.

1. Профессиональное военное образование, находясь в состоянии глубокого реформирования, до сих пор не имеет прочного баланса между фундаментальностью содержания и практической ориентацией результатов, в нем не сделан окончательный выбор вариантов объема и структуры основной образовательной профессиональной программы, нет собственных стандартов подготовки специалиста.

2. В отношении инженерной графики сложилась далеко не точная оценка ее значения в военно-профессиональной деятельности, в подготовке военного инженера, в развитии технической культуры специалиста.

Наконец, в процессе диагностики было установлено, что слабость графической подготовки курсантов влияет на выполнение ими учебно-профессиональных задач военного инженера, в особенности, если эти задачи ставятся в реальной обстановке – на практике и войсковой стажировке.

Можно заключить, что выявленное нами актуальное значение инженерной графики в профессиональной деятельности современного военного инженера пока не полностью учтено в образовательном процессе военного вуза. В исследуемой практике достаточно активным и острым является *противоречие* между значением инженерной графики в профессиональной подготовке военного инженера и местом, ролью графических дисциплин в учебном плане и образовательном процессе.

Если говорить об организации деятельности преподавателя графических дисциплин военно-технического вуза, в процессе диагностического исследования нами было выявлено не полное соответствие существующей дидактической системы обучения курсантов инженерной графике меняющимся условиям образовательного процесса военно-технического вуза. Фактически, вместо выработки новых принципов обучения, новой организации учебной деятельности, преподаватели только ликвидировали последствия административных решений, стремились адаптировать традиционную организацию учебного процесса к меняющимся условиям, обеспечить, в большей степени, сохранение, чем развитие исследуемой дидактической системы.

Анализ учебно-методического комплекса самой графической дисциплины показал, что его содержание, безусловно, повторяет общие подходы, принятые в военно-инженерном образовании, но не в полной мере отвечает актуальным потребностям профессиональной подготовки военного инженера. Принципиальные несоответствия в организации обучения курсантов военно-технического вуза инженерной графике, анализ учебных планов и учебно-методических комплексов позволяет предположить, что в исследуемой практике существует *противоречие* между актуальными условиями образовательного процесса военно-инженерного вуза и наличием отвечающей им дидактической системы обучения курсантов инженерной графике.

Резюмируя представленные результаты диагностического исследования, подчеркнем, что при обучении курсантов военно-технического вуза инженерной графике нами обнаружено, по крайней мере, три противоречия, которые подтверждают актуальность проблемы повышения качества обучения. Ее решение, на наш взгляд, связано:

- с восстановлением за графической подготовкой курсантов (студентов) статуса фундаментальной дисциплины, изменением ее места в учебном плане, общего объема изучаемой дисциплины;
- с научной разработкой дидактических основ графической подготовки курсантов (студентов).

**Литература**

1. Приказ Минобрнауки России от 6 октября 2009 года № 413 «Об утверждении и введении в действие федерального государственного образовательного стандарта среднего общего образования» [электронный ресурс] // Министерство образования и науки Российской Федерации. – Режим доступа: https://xn--80abucjiibhv9a.xn--p1ai/documents/2365 (дата обращения 26.03.2018).

2. Якиманская И.С. Сборник тестовых методик / И.С. Якиманская, В.Г. Зархин, О.С. Зяблова, Х.- М.Х. Кадаяс, А.Ю. Лебедев. М.: Фолиум, 1993. 68 с.

УДК 519.21

# ЭКСПЕРТИЗА РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ ЖУРНАЛОВ: ЗАЧЕМ ОНА НУЖНА

# PEER–REVIEWED JOURNAL EXPERTISE: WHY IT IS NEEDED

Николай Михайлович Емелин
*заслуженный деятель науки и техники РСФСР*
*доктор технических наук, профессор*
главный научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»
Адрес: 115093, Москва, ул. Люсиновская, д. 51
Тел.:+7 (499) 706-81-24
E-mail: nme47@mail.ru

**Аннотация**

Предлагается алгоритм проведения экспертизы рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, включающий два этапа: подготовка для экспертных советов информационных материалов по журналам и оценка журналов экспертными советами.

**Ключевые слова:** рецензируемые научные издания, перечень, научные специальности, оценка, рейтингование, метод.

**Summary**

The article proposes an algorithm for conducting an examination of peer-reviewed scientific publications, which should publish the main results of dissertations for the degree of candidate of science, for the degree of doctor of science, the algorithm includes two stages: preparation for expert councils of information materials on journals and evaluation of journals by expert councils.

**Keywords:** Peer-reviewed Scientific Publications, list, scientific specialties, evaluation, rating, method.

Продолжая развернутый на страницах журнала обмен мнениями о процедуре формирования Перечня рецензируемых научных изданий, зададимся простым вопросом: «А к чему же мы движемся в настоящее время?»

Понятно, что количественно Перечень будет неуклонно расти, проходя при этом экспертизу, проводимую экспертными советами ВАК. Анализ Перечня от 24 марта 2020 года (заметим, что больше Перечень не выходил) включает уже 2472 научных издания. Наверно, неплохо, что таких изданий, рекомендованных экспертными советами ВАК, с каждым годом становится все больше. Однако настораживает, что в Перечне более 200 изданий, которые заявили от 20 до 40 научных специальностей (а ужесточить бы в [1] требование о вхождении в Перечень не более чем по пяти научным специальностям и отраслям наук в каждой группе специальностей). И другой вопрос: какое же количество журналов целесообразно иметь по каждой научной специальности и как отобрать наиболее сильные журналы по каждой научной специальности?

Именно на эти вопросы может дать ответы экспертиза научных изданий, входящих в Перечень. И ведущая роль здесь отводится экспертным советам ВАК. Ведь Перечень – это прежде всего инструмент ВАК, которая рассматривает диссертации по научным специальностям, а соискатели обязаны публиковать свои результаты в журналах, входящих в Перечень по этим специальностям и отраслям наук.

**Нам видится следующий алгоритм проведения экспертизы.**

**Этап 1. Подготовка для экспертных советов информационных материалов по журналам**

**1.1. Составление списков журналов по каждой научной специальности и отрасли наук.**

**1.2. Определение избыточности журналов по каждой научной специальности и отрасли наук.**

В качестве показателя избыточности предлагается использовать отношение числа изданий по каждой научной специальности и отрасли наук к среднему количеству защит диссертаций за три последних года по этой специальности и отрасли [2]. В качестве порогового значения показателя принимается его медианное значение среди всех специальностей и отраслей. Зная

значение показателя избыточности по каждой научной специальности и отрасли наук, нетрудно относительно порогового значения найти количество избыточных журналов по рассматриваемой научной специальности и отрасли наук.

**1.3. Построение рейтинга журналов по каждой научной специальности и отрасли наук.**

**1.3.1. Выбор показателей для построения рейтинга.**

Все журналы, входящие в Перечень, зарегистрированы в РИНЦ и имеют свои значения библиометрических показателей. Но из них подавляющее большинство значений являются абсолютными. Более того, они характеризуют журнал в целом, а не по научным специальностям.

Наиболее предпочтительным среди относительных показателей является показатель «Место журнала в рейтинге SCIENCE INDEX». Именно он рассчитывается хотя бы для десяти тематических направлений:

1. Математика, компьютерные и информационные науки.
2. Физико-химические, астрономия.
3. Науки о Земле и смежные науки.
4. Биологические науки.
5. Техника и технологии.
6. Медицинские науки и здравоохранение.
7. Сельскохозяйственные науки.
8. Общественные науки.
9. Гуманитарные науки.
10. Междисциплинарные науки .

Поэтому **в качестве основного показателя** предлагается использовать показатель «Место журнала в рейтинге SCIENCE INDEX», производный от показателя «SCIENCE INDEX» и рассчитывающийся как

$$SI=(IF_{кор.})/(HHI_{норм.}),$$

где $IF_{кор.}$ – скорректированное значение 5-летнего импакт-фактора журнала;

$HHI_{норм.}$ – индекс Херфиндаля по цитирующим журналам, нормированный на его возможное минимальное значение в данном направлении.

Мы понимаем, что этот показатель позволяет построить рейтинг внутри широкого тематического направления, а отнюдь не по научной специальности. К тому же, особенностью этого показателя является его определение через 5-летний импакт-фактор журнала, который в большей степени учитывает статьи длительного воздействия на отрасль знаний, и для молодых изданий является заведомо проигрышным (так как количество журналов в Перечне, выходящих от 2-х до 3-х лет, с каждым годом увеличивается, почему бы в требованиях к журналам не установить, что до момента подачи заявления журнал должен выходить не менее 5-ти лет).

Возвращаясь к выбору показателей, предлагается ввести **дополнительный интегральный показатель** следующих шести показателей:

- Двухлетний импакт-фактор РИНЦ;
- Двухлетний импакт-фактор по ядру РИНЦ;
- Пятилетний импакт-фактор РИНЦ;
- Пятилетний импакт-фактор по ядру РИНЦ;
- Пятилетний индекс Херфиндаля по цитируемости;
- Десятилетний индекс Хирша,

которые нормируются *(по среднему)* и свертываются в интегральный показатель *(методом линейных сумм)* [3].

**1.3.2. Рейтингование научных изданий.**

Строятся два рейтинга научных журналов по каждой научной специальности и отрасли наук: основной – по показателю «Место журнала в рейтинге SCIENCE INDEX» и дополнительный – по интегральному показателю.

**Этап 2. Оценка журналов экспертными советами**

**2.1. Анализ основного и дополнительного рейтинга**.

Эксперт выявляет журналы, попавшие в избыточные по основному показателю (напомним, что он отражает место в широком тематическом направлении), но по дополнительному показателю (а это порой видно даже по названию журнала), могут претендовать на оставление в перечне.

В качестве примера возьмем научную специальность 13.00.05 (педагогические науки), по которой в Перечне – 40 изданий. При этом:

- отношение количества изданий к числу защит за 3 года равно 2,93;
- пороговое значение по медиане – 1,29;
- количество избыточных журналов – 22, достаточных – 18.

По дополнительному интегральному показателю из 18 достаточных – четыре журнала не проходят:

- Вестник Санкт-Петербургского государственного института культуры / Vestnik of Saint Petersburg State University of Culture (рейтинг – 25),
- Вестник Казанского государственного университета культуры и искусств (29),
- European Social Science Journal («Европейский журнал социальных наук») (24),
- Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета (21).

И наоборот: из 22 избыточных – три имеют высокий интегральный показатель:

- Педагогический журнал Башкортостана (9),
- Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Образование» (7),
- Человеческий капитал (13).

**2.2. Дополнительный анализ журналов.**

На эти семь «спорных» журналов экспертам следует обратить более пристальное внимание: по составу редколлегий, качеству статей по специальности и т.п. По решению экспертного совета эти журналы (и не только) могут быть перенесены из состава избыточных в достаточные и наоборот. Так может быть получен список достаточных журналов в Перечне по всем научным специальности и отраслям наук. При этом представляется целесообразным в Перечне по одной научной специальности и отрасли наук иметь не менее 10 научных изданий.

В заключение отметим, что результаты определения достаточности были бы более достоверными, если бы издания, входящие в Перечень без экспертизы как издания, учитываемые международными базами данных, указали, по каким научным специальностям и отраслям наук принимаются статьи с научными результатами соискателей (а почему бы это не прописать в требованиях к этим журналам [1]). Тогда на самом деле был бы сформирован единый Перечень рецензируемых изданий.

**Литература**

1. Приказ Минобрнауки России от 12 декабря 2016 г. №1586 с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 12 февраля 2018 г. №99.

2. Емелин Н.М., Аляева Ю.В. Алгоритм оценки достаточности журналов, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий// Известия Института инженерной физики, 2019. №4(54). С.98-100.

3. Аляева Ю.В., Емелин Н.М. Метод определения рационального количества научных изданий при формировании Перечня рецензируемых научных изданий// Известия Института инженерной физики, 2020. №1(55). С.92-96.

# AUTHORS


**Abazina Evgeniya S.** Candidate of Technical Sciences, lecturer of the Department of networks and communication systems of space complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Abramova Tatyana V.** Senior lecturer of the Department of Applied mathematics and computer science of the Magnitogorsk state technical University named after G.I. Nosov. Chelyabinsk reg., Magnitogorsk, Lenin Ave., 38.

**Alatortsev Alexey I.** Doctor of technical Sciences. Head of department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Atakishchev Oleg I.** Doctor of Technical Sciences, professor. Deputy general director for special projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Beketov Andrey N.** Senior Lecturer, Department of Physical Education, Southwestern State University. Kursk, st. 50 years of October, 94.

**Beketov Igor N.** Senior Lecturer, Department of Physical Education, Southwestern State University. Kursk, st. 50 years of October, 94.

**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, Bolshoy Udarny l., 1a.

**But Gennady S.** Candidate of technical Sciences, associate professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**Buynevich Irina A.** Post-graduate student of the Department of information systems and technologies of the South-Western state University, head of the Department of infotelecommunication technologies. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Chernousov Maxim S.** Adjunct. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Dontsov Dmitry V.** Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Elistratov Alexander V.** Leading engineer. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Emelin Nikolay M.** Honored Scientist of the RSFSR, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of FSBSE «Gosmetodcentr». Moscow, Lyusinovskaya street, 51.

**Erunov Anatoly A.** Candidate of Technical Sciences, lecturer of the Department of networks and communication systems of space complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Frolov Sergey N.** Candidate of Technical Sciences, leading researcher at the Center for Advanced Research and Development, Southwestern State University. Kursk, ul. 50 years October, 94.

**Golov Dmitriy Y.** Candidate of Technical Sciences. Head of the Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Gusenitsa Yaroslav N.** Candidate of Technical Sciences. Head of the testing laboratory of Military innovation Technopolis «ERA». Krasnodar region, Anapa, Pioneer Ave., 28.

**Kashirina Elena I.** Candidate of Historical Sciences, corresponding member of Academy of Military Sciences, Associate Professor of computer technology and information security KubGTU. Krasnodar, Moscowskaya street, 2.

**Kashirina Olga Yu.** Candidate of Technical Sciences, Professor Academy of Military Sciences, senior specialist MAIS «Institute of engineering physics», assistant to the Deputy of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation. Moscow region, Serpukhov, Bolshoi Yudarniy l., 1A.

**Khalikova Kuralai S.** Teacher of the Department of mechanics and engineering graphics. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Khalin Yuri A.** Candidate of Technical Sciences, associate professor. Associate professor of the Department of Information Systems and Technologies, Southwestern State University. Kursk, st. 50 years October, 94.

**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.

**Korobkov Alexey A.** Candidate of Technical Sciences, associate Professor, head of scientific and methodological Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Kosyak Alexander I.** Candidate of Technical Sciences, senior researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Kulakov Vladimir V.** Doctor of Historical Sciences, Professor, full member of Academy of Military Sciences, International Academy of Sciences, International Academy of tourism and local history. Professor of Financial University under the government of the Russian Federation. Moscow, Leningradsky prospect, 49.

**Kuzin Alexander V.** Department head strategic weapons, space and special means, electronic components base Directorate of military representations of the RF Ministry of Defense. Moscow, Komsomolsky pr-t, 18, build. 3.

# AUTHORS


**Kvashennikov Vladislav V.** Doctor of Technical Sciences, the leading scientific employee Joint-stock company «The Kaluga scientific research institute Telemechanical devices». Leading researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Kvashennikov Vladislav V.** Doctor of Technical Sciences, the leading scientific employee Joint-stock company «The Kaluga scientific research institute Telemechanical devices». Kaluga, st. Karl Marx, 4.

**Lesnykh Vadim N.** Junior scientist. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

**Levanov Denis V.** Adjunct of the Department of networks and communication systems of space complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Martynov Alexander P.** Doctor of Technical Sciences, Professor. Head of Department FSUE «RFNC-VNIIEF». Nizhny Novgorod reg., Sarov, av. Mira, 37.

**Martynova Inna A.** Candidate of Technical Sciences. Lecturer at the Department of «Radiophysics and Electronics» SFTI NIYAU MIFI. Moscow, Izchorskya st., 13/2.

**Mavrina Irina A.** Doctor of Pedagogical Sciences, Professor. Professor of the Department of social pedagogy and social work of OmSPU. Omsk, Partizanskaya st., 4A.

**Mishukov Oleg A.** Laboratory engineer. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Murashov Aleksandr G.** Vice-President of the Institute of engineering physics, head of a separate division of the Institute of engineering physics in Moscow. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoi Yudarniy l., 1A.

**Nikolaev Dmitry B.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor. Leading Researcher FSUE «RFNC-VNIIEF». Nizhny Novgorod reg., Sarov, av. Mira, 37.

**Orkin Vadim V.** Candidate of Technical Sciences, lecturer of the department. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Ryzhenkov Vyacheslav A.** Candidate of Technical Sciences. The head of Department orders, special means of Ministry of defence. Moscow, Myasnitskaya str., 37A.

**Sevost'yanov Andrey S.** Adjunct of the Department of networks and communication systems of space complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Shadrin Alexander G.** Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of networks and communication systems of space complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

**Shamanov Vladimir A.** Doctor of technical Sciences, Deputy of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation, Chairman of the defense Committee of The state Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation, Hero of the Russian Federation, Professor of the Financial University under the Government of the Russian Federation. Moscow, Okhotny Ryad str., 1.

**Shimanov Sergey N.** Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation. Honorary radio operator of the Russian Federation. Doctor of Technical Sciences, Professor. Leading Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Shitov Alexey N.** graduate student at Southwestern State University. Kursk, st. 50 years of October, 94.

**Sinitsyn Sergey V.** Candidate of technical Sciences, associate professor. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg. , Serpukhov, Brigadnaya St., 17.

**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.

**Splyukhin Denis V.** Researcher FSUE «RFNC-VNIIEF». Nizhny Novgorod reg., Sarov, av. Mira, 37.

**Titenko Evgeny A.** Candidate of Technical Sciences, associate professor. Associate professor of the Department of Information Systems and Technologies, Southwestern State University. Kursk, st. 50 years October, 94.

**Tsvetkov Kirill Yu.** Doctor of Technical Sciences, professor. Head of the department of networks and communication systems of space complexes. Military space Academy named after A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

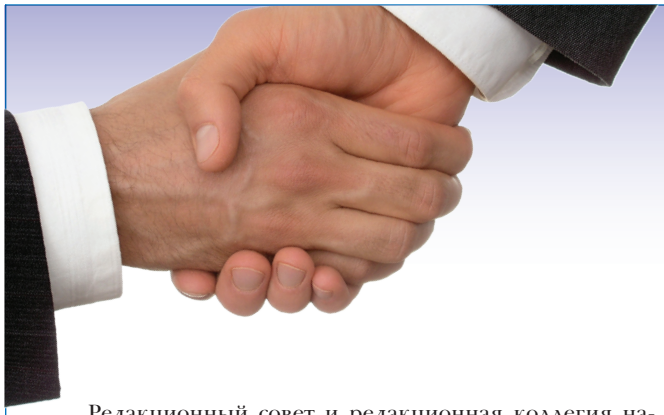
**Tzar'kov Alexey N.** Honoured scientist of Russia, Doctor of Technical Sciences, professor. President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Volkov Gennadiy G.** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny l., 1a.

**Zelenevsky Anatoly V.** Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of Department. CJSC «Firm of Scientific and Technical Center «KAMI». Moscow, Heroes Panfilovtsev st., 10.

**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 Forse. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

**Zelenevsky Yury V.** Doctor of Technical Sciences, associate professor, is at the disposal of the head. Military Academy of the Strategic Missile Forse. 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.

INTERREGIONAL PUBLIC INSTITUTION
"INSTITUTE OF ENGINEERING PHYSICS"
(SCIENTIFIC, EDUCATIONAL AND INDUSTRIAL INSTITUTION)

## CONTENTS


### INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION–MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

**Alatortsev A.I., Golov D.Y.**
Modeling of reliability indicators of individual components of rocket systems under different laws of strength and stress distribution ..... 2

**Kolombet V.A., Lesnykh V.N., Elistratov A.V.**
Triplicator as a formation mechanism for the universal period-tripling system ..... 5

### RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

**Kvashennikov V.V., Bugakov I.A, Kuzin A.V.**
Estimation of probabilities of reception noiseproof code in channels with independent and grouped errors ..... 11

**Erunov A.A., Levanov D.V., Sevost'yanov A.S.**
Method of organizing multi-priority access in a group covert channel with a variable bit rate ..... 17

**Tsvetkov K.Yu., Shadrin A.G., Abazina E.S., Ryzhenkov V.A.**
Application of digital steganography technologies to ensure the sustainability of control systems ..... 21

**Kosyak A.I., Shimanov S.N., Dontsov D.V.**
Transmitting requests in the dual-use mode of the request channel using the algorithm of tactile random multiple access (strategy 2) ..... 26

**Zelenevsky V.V., Chernousov M.S., Zelenevsky Y.V., Zelenevsky A.V.**
Method for assessing the noise immunity of digital systems with code data compression under the influence of stationary interference ..... 31

### INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

**Gusenitsa Y.N., Mishukov O.A., Orkin V.V., Korobkov A.A.**
Method of identifying maneuvering spacecraft based on neural network classification of radar images ..... 37

**Kashirina O.Yu., Kashirina E.I., Kulakov V.V., Murashov A.G., Shamanov V.A.**
The state and main directions of development of weapons , equipment and communications of combat swimmers ..... 44

**Atakishchev O.I., Titenko E.A., Frolov S.N., Shitov A.N., Beketov I.N., Beketov A.N.**
Mathematical model for determining the location of a CUBESAT nanosatellite ..... 51

**But G.S., Sinitsyn S.V.**
Mathematical model of heat energy accumulation process ..... 57

**Abramova T.V., Buynevich I.A., Titenko E.A., Khalin Y.A.**
Method and algorithm for weighted average fuzzy ranking and clustering of innovative projects ..... 62

**Martynova I.A.**
Theoretical and functional analysis of transformation functions of information and cryptographic systems ..... 73

**Martynov A.P., Martynova I.A., Nikolaev D.B., Splyukhin D.V.**
Matches, displays, and images of information system elements ..... 78

**Volkov G.G., Smurov S.V., Tzar'kov A.N.**
Multi-dimensional complex projective spaces in quantum physics and quantum information ..... 84

### PROFESSIONAL EDUCATION

**Khalikova K.S., Mavrina I.A.**
Training of cadets of a military technical university in engineering graphics: contradictions ..... 95

### SCIENTOMETRY

**Emelin N.M.**
Peer-reviewed journal expertise: why it is needed ..... 98

**AUTHORS** ..... 101

**THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS** ..... 103

**REQUIREMENTS TO AUTHORS** ..... 104


**Учредитель и издатель – МОУ «ИИФ».** Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а

Подписной индекс: 59190 по каталогу «Научно-технические издания» ОАО «Роспечать»

**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

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации СМИ ПИ №ФС77-26650 от 20 декабря 2006 г.
Отпечатано на полиграфической базе МОУ «ИИФ».
Адрес: 142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а.
Подписано в печать 10.12.2020.
Дата выхода в свет 15.12.2020. Тираж 2000 экз. Цена свободная.
© Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики» (ИИФ), 2020

**Межрегиональное общественное учреждение**

# «Институт инженерной физики»

**(МОУ «ИИФ»)**

**научное, образовательное и производственное учреждение**

142210, Московская обл., г. Серпухов, Большой Ударный переулок, д. 1а
http://www.iifrf.ru e-mail:info@iifmail.ru
Тел.: +7(4967) 35-31-93, 35-13-71 факс: +7(4967) 35-44-20 моб.: +7 (499) 400-05-75